

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ В.А.Пасічник
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(код і назва)

на тему: Інструмент для розрізання волокнистих полімерних композиційних матеріалів

Виконав : студент 6 курсу, групи МІ-71мп
(шифр групи)

Чітак Владислав Віталійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник Корбут Євген Валентинович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет)) Механіко-машинобудівний

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 8.05050302 Інструментальне виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А.Пасічник
(підпис)

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Чітак Владислав Віталійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Інструмент для розрізання волокнистих полімерних композиційних матеріалів

науковий керівник дисертації Корбут Євген Валентинович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Свердло зпідрізними різальними кромками _____

4. Предмет дослідження Методи удосконалення обробки полімерних композиційних матеріалів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Проаналізувати методи підвищення стійкості інструменту при обробці композитних матеріалів . Визначити оптимальні геометричні параметри свердл для ПКМ. Провести випробовування для дослідження силових характеристик _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз видів свердл для обробки ПКМ	5.11.17	
2	Аналіз взаємодії інструмента та КМ		
3	Аналіз геометричних параметрів свердла	27.05.18	
4	Дослідження силових характеристик		
5	Дослідження режимів різання	27.10.18	
6	Підвищення продуктивності при обробці КМ	2.12.18	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АНОТАЦІЯ

Одним з розповсюджених методів обробки елементів із ПКМ є свердління отворів під установку кріпильних елементів. При свердлінні спостерігаються похибки обробки, зокрема, вспучування, розшарування матеріалу, розтріскування між волокнами в шарах ПКМ, відхилення форми отворів, припалення (внаслідок високої температури в зоні різання). В результаті, свердління отворів вимагає принципово нових технологічних рішень .

Тому механізм впливу технологічних параметрів на силові характеристики процесу і якість поверхні деталей з КМ представляє значний інтерес як для науки, так і для виробництва.

В данній роботі проводилося дослідження впливу геометричних параметрів інструменту на силові характеристики . Дослідження силових залежностей проводилося з метою визначення впливу різних геометричних параметрів свердел на осьове зусилля і крутний момент, тому що по ним можна судити про працездатність свердел і «прогнозувати» стійкість.

ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ , ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ,
ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ , МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ .

ANNOTATION

One of the most widespread methods of processing PC materials is drilling perforations for attaching fasteners. During drilling some processing faults, such as heaves, material exfoliation, cracking in between layers of PC material, form-factor deviation and cauterization are observed. Considering points stated above, drilling requires fundamentally new technological decisions.

This is why the principle of technical parameters influence on power-characteristics of the process and quality of the surface areas of PC material components is particularly important both for science and production.

This work is a result of research in field of influence of geometric parameters of the instrument on power-characteristics. Research of power relations was conducted to achieve a goal of determining the influence of different geometric parameters of borers on both axial force and torque. Because of these parameters one can judge the working capacity of borers and “predict” the fortitude.

GEOMETRIC PARAMETERS, POLYMER-COMPOSITE MATERIALS, TECHNOLOGICAL METHODS, TECHNIQUE AND EQUIPMENT

Реферат

Перспективи розвитку нової техніки, особливо авіаційної та космічної, на сьогодні пов'язують зі широким використанням композиційних матеріалів, унікальність властивостей яких дозволяє у багатьох випадках значно підвищити експлуатаційні характеристики конструкційний виробів, а також знизити трудоемність і матеріалоемність їх виготовлення, сприяючи тим самим росту конкурентоздатності вітчизняної продукції на світовому ринку.

Реалізація можливостей конструкційних властивостей, закладених у композитах, залежить від ступеня гарантованого забезпечення якості виробів на етапі їх механічної обробки. Найбільш технологічно складними задачами при виготовленні виробів з композиційних матеріалів є підвищення продуктивності механічної обробки (точіння, свердлення та ін.), що досягається підвищенням працездатності інструменту, від характеристик якого залежить надійність та економічність його роботи за складних умов високих швидкостей, навантажень, температур, хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом, а також високих вимог до геометрії обробки та якості оброблених поверхонь.

Метою данної роботи було розроблення шляхів удосконалення обробки полімерних композитних матеріалів та покращення працездатності інструменту шляхом зміни його геометричних параметрів.

Проаналізувати методи підвищення стійкості інструменту при обробці композитних матеріалів.

Визначити оптимальні геометричні параметри свердл для ПКМ.

Провести випробовування для дослідження силових характеристик.

Проведено класифікацію композиційних матеріалів та проаналізовано ефективність методів неруйнівного контролю конструкцій із композитів. Встановлено, що композиційні матеріали характеризуються істотним

розходженням фізичних властивостей та анізотропією, що значно ускладнює їх механічну обробку та контроль якості виготовлених виробів.

Підвищення ефективності операцій свердління отворів в різних ПКМ може бути досягнуто шляхом застосування спеціалізованих свердел, індивідуально розроблених для кожної групи матеріалів. Для обліку специфічних вимог і особливостей обробки кожного матеріалу підбирається геометрична форма свердел, яка оптимізована завдяки використанню різних значень передніх кутів і кутів при вершині.

Використання результатів даної роботи на виробництві надає можливість отримати значну економію матеріально-технічних, людських та часових ресурсів , підвищити зносостійкість РІ, продуктивність механічної обробки композиційних матеріалів з одночасним покращенням якості кінцевих виробів. Це сприятиме підвищенню конкурентноспроможності продукції як оброблюваного матеріалу так і виготовлених інструментів .

ЗМІСТ

стор.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
1 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	6
1.1 Композиційні матеріали для авіабудування.....	
1.2 Види свердл для обробки отворів в КМ	13
1.3 Особливості взаємодії робочої частини інструмента та КМ	19
2 МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ УПРАВЛІННЯ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ІНСТРУМЕНТУ.....	33
2.1 Концепція управління процесами контактної взаємодії у системі “інструмент – композиційний матеріал“.....	
2.2 Методика та обладнання досліджень силових характеристик	41
3 МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБОВУВАНЬ.....	45
3.1 Результати випробувань в умовах абразивного зношування	50
3.2 Методика визначення оптимальних режимів механічної обробки композиційних матеріалів.	53
3.3 Принципи формування оптимальної якості поверхні інструменту для даних умов обробки і мінімізації зносу	57
3.4 Методика підвищення продуктивності та якості інструменту при обробці композиційних матеріалів. Фізико-технологічні основи підвищення продуктивності обробки композиційних матеріалів.....	62

ВИСНОВКИ.....

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КМ – композиційні матеріали;

ПКМ – полімерні композиційні матеріали;

РІ – різальний інструмент;

МКМ – металеві композиційні матеріали

ККМ – керамічні композиційні матеріали

ВВКМ – вуглець-вуглецеві композиційні матеріали

Вступ

В даний час все більш широке застосування знаходять вироби з композиційних полімерних матеріалів . При виготовленні цих виробів використовуються різні методи обробки - від лазерного та гідроабразивного до механічної обробки тиском і різанням . Вибір методу обробки визначається вимогами по продуктивності і якості, а також вартістю реалізованого методу. Як правило, дорогі методи, такі як лазерні й гідроабразивні, доцільно використовувати в умовах масового виробництва виробів і підвищених вимог до якості обробки.

Обробка тиском, наприклад штампування, також вимагає застосування дорогих обладнання і оснастки. Найбільш доцільним з точки зору оптимального поєднання ціни і якості і широко використовуваним методом є механічна обробка виробів різанням. У цьому випадку також використовується широка гама інструментів - від лезових до алмазних, вибір яких визначається структурою і властивостями оброблюваних матеріалів. Потрібно враховувати армування волокон, склад матеріалу і його фізичні властивості. У кожному конкретному випадку в літературі не наводиться однозначних рекомендацій за вибором того чи іншого інструменту. Відсутні дані по обробці виробів, поєднують композиційний полімерний матеріал і загартовану сталь. Тому актуальним є дослідження механічної обробки комбінованих матеріалів, включають загартовану сталь і композиційний склопластиковий матеріал.

Прагнення підвищити продуктивність різанням накладає обмеження на технологічні параметри процесу з тим, щоб забезпечити надійність і термін служби деталей в умовах експлуатації. При цьому одним з основних

параметрів обробки є якість одержуваної поверхні. Найбільш поширена операція при механічній обробці - це свердління. У процесі різання підвищений знос інструменту змінює вид сходить стружки,більшує сили різання і погіршує якість оброблюваної поверхні.Тому механізм впливу технологічних параметрів на силові характери-стіки процесу і якість поверхні деталей з КМ представляє значний інтерес як для науки, так і для виробництва.

1 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Композиційні матеріали для авіабудування

Нині прогрес в авіабудуванні в основному пов'язується з розробкою і широким застосуванням КМ [1-4]. КМ мають комплекс властивостей і особливостей, що відрізняються від традиційних конструкційних матеріалів (металевих сплавів) і в сукупності відкривають широкі можливості як для вдосконалення існуючих конструкцій найрізноманітнішого призначення, так і для розробки нових конструкцій і технологічних процесів.

У всіх випадках КМ - це система різних матеріалів, кожна з її компонентів має свою специфіку щодо цього готового виробу. Ні гума, так і шини авіаційних автобусів не можуть самотійно виконувати свої функції. Вони використовуються разом і їх слід розглядати як єдину систему. Спільна робота різних матеріалів дає ефект, порівнянний з утворенням нового матеріалу, властивості якого кількісні і якісно відрізняються від властивостей матеріалів - їх складових.

КМ є гетерофазними системами, отриманими з двох або більше компонентів, із збереженням індивідуальності окремого компонента [5]. Для конструкційних КМ характерні наступні ознаки [6]:

- склад і форма компонентів матеріалу визначені заздалегідь;
- компоненти є присутніми в кількостях, що забезпечують задані властивості матеріалу;
- матеріал є однорідним у макромасштабі та неоднорідним у мікромасштабі (компоненти розрізняються за властивостями, між ними існує

явна межа розділу).

Властивості КМ залежать від складу компонентів, їх поєднання, якісного співвідношення і міцності зв'язку між ними.

За формою структурних елементів КМ поділяються на волокнисті, що складаються з волокон в матпіді; шпувати - від шапових маттіліалів; дисперсно-зміцнений - з матовим, наповненим частинками; псевдопластика - порошков, матпідца, наповнена більш легкоплавким матепіалом; евтектик, відібраний за допомогою спеціальної кристалізації евтектичних сплавів [7,8]. Найбільш поширене застосування було знайдено у типах КМ: КМ, імітованих частинками; КМ згорнуті з волокнами; голені КМ.

За типом матриці КМ можна розділити на три групи: металеві, полімерні і керамічні. Серед цих типів лише КМ з полімерною матрицею мають загальноприйняті назви, що об'єднують тип армуючих волокон з типом матриці: вуглепластики, склопластики, боропластики, металопластики. Композиційні матеріали з металевою і керамічною матрицями позначаються подвійною назвою, що поєднує назву матриці і волокон, наприклад: Cu - W, WC - CO, AlO_3 - Al і т. д.

За призначенням КМ класифікуються на конструкційні, корозійностійкі, триботехнічні (антифрикційні, фрикційні) [9, 10], абляційні, п'єзоелектричні, теплозахисні тощо.

У літературі досить часто зустрічається класифікація КМ за галузями застосування: для аерокосмічної промисловості, суднобудування, автомобілебудування, електроніки, стоматології, ортопедії тощо [11, 12].

За типом орієнтації армуючих елементів КМ можна розділити на хаотично-армовані (з дисперсними включеннями, дискретними волокнами) і впорядковано-армовані.

Як наповнювач та армуючий компонент найчастіше застосовуються тонкодисперсні порошкоподібні частки або волокнисті матеріали різної природи [8]. У зв'язку з цим КМ розділяються на дві основні групи: дисперсно-зміцнені і волокнисті.

У волокнистих матеріалах як зміцнювач застосовують волокна бору, скляні, вуглецеві, органічні, волокна і на основі ниткоподібних кристалів (оксидів, карбідів, борида, нітрида та ін.), а також металеві (дроту).

Волокнисті армуючі елементи – це, як правило, безперервні волокна, представлені у вигляді кручених і некручених ниток, джгутів, стрічок, тканин різного переплетення, а також короткі волокна у вигляді порошоків, штапельних тканин, матів і тощо.

Металеві композиційні матеріали (МКМ). До МКМ відносяться метали, зміцнені безперервними або дискретними волокнами (а також частками). Матричними матеріалами є: алюміній, магній, титан, нікель, суперсплави; волокнами - бор, вуглець, вольфрам, тугоплавкі оксиди, карбіди, нітрид і тонкий дріт з високоміцної сталі. Кількість зміцнювача може складати від 10 до 60%. МКМ мають наступні переваги перед полімерними КМ: вищі температури експлуатації; підвищені значення поперечного модуля пружності й модуля зрушення при однонапрявленому армуванні, вищі електро- і теплопровідність, стійкість до радіації, стабільність розмірів; відсутність водопоглинання і газовиділень. Основними недоліками МКМ є складність технології виготовлення і висока вартість. Основними МКМ є Al - SiC, Al - C, Al - оксиди. Через високу твердість КМ важко піддаються механічній обробці.

МКМ на основі алюмінію, армовані керамічними волокнами, набули досить широкого поширення в авіабудуванні. В автомобільній промисловості вони застосовуються для виготовлення поршнів дизелів, глушників та ін.

Композиційні матеріали на основі алюмінію (А1 - В і АІ - Ве) використовували при виготовленні основних деталей космічного апарату "Атлас", деталей шлюзових відсіків повертаних космічних апаратів, елементів вантажних маніпуляторів космічних апаратів.

Однією з основних деталей фюзеляжу літака є лонжерон. Заміна лонжерона, виготовленого з традиційних металевих матеріалів, на МКМ А1 - В призводить до зниження його маси на 30 %.

Дуже перспективні для конструкцій літальних апаратів МКМ системи алюміній - бор у вигляді пластин, що застосовують для елементів жорсткості, панелей, лонжеронів, стрингерів, шпангоутів та ін.

Попівняно КМ з поліметалів КМ із металевими матрицею мають вищу міцність при навантаженні в припайми, поперечну до осі поштовуванню волокон під час зсуву, стиснення і згинання. Зі зростанням температури експлуатації вище 150 - 200 ° С, пепвагаз КМ з металевими матриці стає все більш і більш значимим. Петро К.М., полімерними матрицями варотності внаслідок більш низької і більш високої питомої міцності або жорсткості В умовах кімнатної температури в даний час шypshe застосування, ніж СМ для металу. Він також відомий своїм багатогранним досвідом у сфері аутсорсингу, наявністю спеціалізованого обладнання та високим технологічним рівнем конструкції.

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ). Для ПКМ характерні високі питома міцність і жорсткість, низькі значення коефіцієнта термічного розширення і тертя, висока зносостійкість, широко варійовані показники тепло- і електропровідності, стійкість до дії агресивних середовищ, іонізуючих випромінювань, термічного і радіаційного удару, легкість переробки [13].

У ПКМ як матриця застосування знаходять різні реактопластики,

передусім поліефірні, епоксидні, фенольні смоли та ін. Останнім часом почали застосовувати ПКМ на основі термопластичних матеріалів, полісульфінів, поліфеніленсульфідів, поліарілсульфонів, поліефірсульфонів, поліефіркетонів, поліамідів, рідкокристалічних полімерів, сумішей, сплавів та ін.

За способом армування ПКМ можна розділити на дві групи: ПКМ, армовані паралельними безперервними волокнами; ПКМ, армовані тканинами.

Перші є багат шаровою волокнистою системою, в якій кожен шар складається з однонаправлених джгутів, стрічок, ниток, розташованих один відносно одного певним способом. У більшості цих матеріалів міцність при розтягуванні вища, ніж при стискуванні, за винятком бороволокнитів. Основний недолік даних ПКМ – їх низькі механічні властивості при поперечному вантаженні і зрушенні, обумовлені недостатньою міцністю матриці.

Для армованих тканинами ПКМ використовують тканини полотняного і сатинового переплетення. Механічні властивості композитів, армованих тканинами, залежать як від типу волокон, виду плетіння, так і від співвідношення волокон по основі до витчу тканини.

Найбільш поширеними ПКМ являються карбоволокніти, бороволокніти і органоволокніти.

Керамічні композиційні матеріали (ККМ). ККМ виготовляють на основі безкисневих матриць і тугоплавких оксидів. Перші діляться на матеріали на основі нітриду кремнію і карбіду кремнію, другі – на основі оксиду алюмінію, діоксиду цирконію, силікатних матриць і тугоплавких оксидів, армованих тугоплавкими волокнами. З цієї групи матеріалів значний

інтерес представляють КМ на основі Si_3N_4 , армовані SiC , легованим оксидами магнію або ітрію. Їх можна використовувати як конструкційний високотемпературний матеріал, наприклад, при виготовленні деталей керамічного двигуна. Окрім волокон SiC , для армування Si_3N_4 перспективні алюмосилікатні або вуглецеві волокна. Композиційні матеріали на основі нітриду кремнію застосовують як конструкційний матеріал для виготовлення передньої частини космічного корабля за програмою "Шаттл".

Вуглець-вуглецеві КМ. Композиційні матеріали з полімерною матрицею працездатні до температури 200 - 250 °С. При вищих температурах відбувається швидка деструкція полімерів. Композиційні матеріали з вуглецевою матрицею тривало працездатні у лужних і нейтральних середовищах до температури (3000 – 3500) °С, в окиснювальних – до температури (350 – 400) °С [14].

Причому міцнісні властивості із зростанням температури не лише не знижуються, а навіть зростають.

Більш вуглець-вуглецеві КМ (ВВКМ) використовувались для теплових проявів космічних апаратів та захисту основних частин сумки. Вони також використовуються для насадок і кемпінгових муфт ракетних двигунів. Заміна деталей з вольфраму та пролітичного графіта в кишенькових соплах на ВВКМ дозволила підвищити їх надійність, зменшити вагу і зменшити масу на 30-50%.

ВВКМ застосовувалися для захисту радіаційних екранів пілотованих космічних апаратів за програмою "Шаттл". За об'ємом промислових виробів з ВВКМ ведучими є гальма літаків. Цьому сприяє висока теплоємність і теплопровідність у поєднанні з міцністю, стійкістю до удару.

ВВКМ використовують для виготовлення температурних трубопроводів, деталей ядерних реакторів, електричних контактів, гарячих

ущільнень і прес-форм гарячого пресування. Для теплового захисту дисків авіагальм застосовують карбоволокнит на вуглецевій матриці типу КУП - ВМ. По міцності і ударній в'язкості він у п'ять-десять разів перевершує спеціальний графіт. Коефіцієнт тертя карбоволокниту складає (0,35 - 0,45), а знос - 0,7 - 1 мм на гальмування.

Для спрощення процесу виготовлення лонжеронів і нервюр як армуючий наповнювач застосовують вуглецеві стрічки. При виготовленні цих конструктивних елементів досягається максимальна економія маси (до 50 % порівняно з алюмінієвими сплавами). Необхідно відмітити, що широке застосування КМ для виготовлення обшивок забезпечує, як правило, в середньому зниження маси елементів конструкцій на 20 %. Таким чином, застосуванням КМ для силового набору є новим етапом зниження їх маси. Слід зазначити, що тенденція, що намітилася, до переходу на конструкції, практично повністю виконані з КМ, викликає необхідність істотного перегляду традиційних методів конструювання і спільного використання КМ з полімерною і металевою матрицями. Досягнуті високі показники вагової ефективності застосування КМ не є граничними. Зниження маси конструктивних елементів, обумовлене застосуванням вуглепластиків, забезпечує можливість додаткового полегшення ряду балансованих агрегатів (наприклад, керма висоти, керма повороту). Слід зазначити, що уперше в світі вертикальне і горизонтальне оперення, повністю виготовлені з КМ, застосовані на літаку Ан - 70.

Широке застосування знайшли сучасні КМ з полімерною матрицею (вугле-, органо- і склопластики) при виготовленні універсального транспортного літака Ан - 225 ("Мрія"). З них виготовлені обтічники шасі і вузли кріплення вантажів, ступки шасі, роздавальні коробки системи кондиціонування повітря, мотогондולי тощо.

Загальна класифікація КМ представлена на рис.1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація композиційних матеріалів

1.2 Види свердл для обробки отворів в КМ

Ріжучий інструмент для виконання отворів з КМ допуску на діаметр по Н11-Н12 - свердла - в пакетах, що містять деталі з ПКМ, представлений у всіх розглянутих компаній-виробників.

Як аналізованих параметрів свердел прийняті наступні:

- матеріал ріжучої частини;
- геометрія ріжучої частини;
- наявність покриття;

У гамі РІ розглянутих виробників представлені окремі рішення для виконання отворів в однорідних і змішаних пакетах.

Свердла для свердління отворів в однорідних пакетах представлені в таблиці 1.2.1, свердла для свердління отворів у змішаних пакетах представлені








таблиці 1.2.2

Таблиця 1.2.3 - Свердла для виконання отворів в однорідних пакетах, що містять деталі з ПКМ







Таблиця 1.1

Виробник та назва інструменту	Зображення РІ	Діапазон діаметрів РІ, мм (дюйм)	Матеріал ріжучої кромки	Покриття	Відповідність стандарту
1	2	3	4	5	6
GÜHRING арт. 1149		2,40 – 12,00	Твердий сплав	–	Стандарт GÜHRING
LMT- ONSRUD Kevlar Drill - 86-000 Series		3,17 – 31,75 (1/8 – 1 1/4)	Твердий сплав	–	Стандарт LMT- ONSRUD
Sandvik Coromant CoroDrill 452.1-C		2,50 – 12,70	Твердий сплав	–	Стандарт Sandvik Coromant
Dormer Solid Carbide Drills for Composite Materials		2,38 – 20,00	Твердий сплав	Алмазне покриття	Стандарт Dormer

Закінчення таблиці 1.1

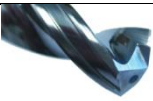
1	2	3	4	5	6
OSG Corporation PCD-DAD		4,86; 6,37; 9,55	Полі-кристалічн алмаз	—	Стандарт OSG Corporation
OSG Corporation D-STAD		4,86; 6,37; 9,55	Твердий сплав	—	Стандарт OSG Corporation
Amamco CD		Може бути виготовлене необхідного розміру.	Твердий сплав	Алмазне покриття або без покриття	Стандарт Amamco
Amamco AM12FH			Твердий сплав		Стандарт Amamco
Amamco AM12FS			Твердий сплав		Стандарт Amamco
Amamco AM12FH-ST25°			Твердий сплав		Стандарт Amamco
SGS 8 Facet Drill		2,70 – 12,00	Твердий сплав	Di-NAMITE	Стандарт SGS

Таблиця 1.2 - Свердла для виконання отворів в змішаних пакетах

Виробник та назва інструменту	Зображення РІ	Діапазон діаметрів РІ, мм (дюйм)	Матеріал ріжучої кромки	Покриття	Відповідність стандарту
1	2	3	4	5	6
GÜHRING арт. 730		0,50 – 16,00	Твердий сплав	—	DIN 6539
GÜHRING арт. 2463		1,00 – 16,00	Твердий сплав	ёFIRE/n anoFIRE	DIN 6539
GÜHRING арт. 702		0,50 – 6,50	Твердий сплав	—	Стандарт GÜHRING
GÜHRING арт. 704		1,50 – 24,50	Твердий сплав	—	Стандарт GÜHRING
LMT- ONSRUD DFC Parabolic Drill - 86-100 Series		2,54 – 25,40 (0,1 – 1,0)	Твердий сплав	—	Стандарт LMT- ONSRUD
LMT- ONSRUD 8 Facet Drill - 67- 800 Series		3,17 – 31,75 (1/8 – 1 1/4)	Твердий сплав	—	Стандарт LMT- ONSRUD

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6
LMT- ONSRUD PCD 8 Facet Drill - 68-900 Series		2,54 – 29,36 (0,1 – 1 5/32)	Поликриста лічний алмаз	–	Стандарт LMT- ONSRUD
Sandvik Coromant CoroDrill 854		4,00 – 12,70	Твердий сплав	Алмазне покрыт тя	Стандарт Sandvik Coromant
Sandvik Coromant CoroDrill 856		4,00 – 12,70	Твердий сплав	Алмазне покрыт тя	Стандарт Sandvik Coromant
Sandvik Coromant CoroDrill 452.1-CM		2,50 – 12,70	Твердий сплав	–	Стандарт Sandvik Coromant
Sandvik Coromant CoroDrill 452.4-CM		2,50 – 12,70	Твердий сплав	–	Стандарт Sandvik Coromant
Walter Titex A1163		1,00 – 12,00	Твердий сплав	–	DIN 6539
Walter Titex A1263		0,60 – 12,00	Твердий сплав	–	DIN 338
Amamco DM		Може бути виготовлене необхідного розміру.	Твердий сплав	Алмазне покрыт тя або без покрыт тя	Стандарт Amamco
Amamco AMDMS5			Твердий сплав	–	Стандарт Amamco
PRECORP 86PTA		3,0 – 16,0	Твердий сплав	Покритт тя з полі-	Стандарт PRECORP

				кристалі чного алмаза	
PRECORP PD-D2WM		1,0 – 25,0	Твердий сплав	—	Стандарт PRECORP

За результатами проведеного аналізу ринку РІ для обробки отворів в однорідних і змішаних пакетах, що містять деталі з ПКМ і металевих матеріалів, можна відзначити наступне:

- вживані матеріали ріжучої частини свердел - твердий сплав і полікристалічний алмаз;
- застосовуються свердла без покриття або з покриттям з полікристалічного алмаза;
- застосування в якості матеріалу ріжучої частини і покриття РІ полікристалічного алмаза забезпечує збільшення стійкості свердел;
- при обробці в змішаних пакетах рекомендується застосування спіральних свердел, що виготовляються за міжнародними стандартами; в однорідних пакетах - спіральних свердел з підрізнаними крайками, з малими кутами при вершині, що виготовляються за стандартами виробників;
- існуюча номенклатура діаметрів свердел для обробки однорідних пакетів обмежена, але доступна можливість оформлення замовлення на виготовлення спеціального РІ;
- при обробці однорідних пакетів з використанням ручного механізованого інструменту рекомендується застосовувати свердла з малими кутами при вершині і нахилі гвинтових канавок (свердла Sandvik Coromant CoroDrill 452.1-C, Amamco AM12);
- основна форма хвостовика свердел, що виготовляються серійно, - циліндрична, але доступна можливість оформлення замовлення на виготовлення спеціального РІ;
- компанії серійно випускають свердла в метричному виконанні - G Ü HRING, PRECORP, SGS, Sandvik Coromant, Walter Titex;

в дюймовому виконанні -

Amamco, Dormer, LMT ONSRUD, OSG Corporation;

- номенклатура ПІ компаній G Ü HRING і Sandvik Coromant є найбільш широкої серед розглянутих виробників.

Як аналог розглянутих вище свердел за доцільне використання в Програмі ВТВЗ свердел спіральних твердосплавних по ОСТ 17274-71.

Таким чином, для включення до Переліку СТО, необхідного для реалізації Програми ВТВЗ, пропонується наступна номенклатура ПІ:

- свердло спіральне по ГОСТ 17274-71;
- свердло Guhring, арт. 2463 з зносостійким покриттям;
- свердло Guhring, арт. 704;
- свердло Guhring, арт. 1 149;
- свердло Sandvik Coromant CoroDrill 452.1- CM;
- свердло Sandvik Coromant CoroDrill 452.1- C;
- свердло Precorp 86PTA;
- свердло Precorp PD-D2WM;
- свердло Sandvik Coromant CoroDrill 854 з алмазним покриттям.

1.3 Особливості взаємодії робочої частини інструмента та КМ

Структура, будова і властивості КМ, їх механічна обробка мають ряд специфічних властивостей порівняно з металами та їх сплавами. Щоби забезпечити потрібну продуктивність обробки деталей із цих матеріалів, необхідно створити спеціальне обладнання і ПІ. Незважаючи на збільшення в останні роки інформації по обробці неметалів різанням, на виробництві все ще відчувається нехватка даних по обробці КМ і конструюванню ПІ [26].

Особливості процесу різання композиційних матеріалів. Різання є одним з основних процесів технологічної обробки матеріалів. При механічній обробці в результаті тертя стружки по передній поверхні інструменту і заготовки по його задній поверхні відбувається його знос, який визиває похибку обробки, погіршує якість виробу, збільшує сили різання.

Процес різання супроводжується великим тиском на РІ, тертям і тепловиділенням.

У процесі різання шар, що зрізається, тисне на передню поверхню інструменту, створюючи в межах площі контакту нормальне напруження. При різанні КМ зі встановленими режимами різання нормальне контактне напруження може досягати значних величин. РІ повинен витримувати такі тиски без крихкого руйнування і пластичної деформації. Оскільки РІ може працювати в умовах змінних значень сил, наприклад через шар металу заготовки, що нерівномірно знімається, важливо, щоб інструментальний матеріал поєднував у собі високу твердість з опірністю стискуванню і вигину, мав високу межу витривалості й ударну в'язкість. Таким чином, інструментальний матеріал повинен відрізнятися високою механічною міцністю.

При різанні з боку заготовки на інструмент діє потужний тепловий потік, внаслідок чого на передній поверхні інструменту встановлюється висока температура. При цьому різальні елементи інструменту втрачають свою твердість і зношуються через інтенсивне розігрівання. Тому найважливішою вимогою, що пред'являється до інструментального матеріалу, є його висока теплостійкість і теплопровідність.

Переміщення стружки по передній і задній поверхнях РІ при високій контактній нарузі і температурах призводять до зношування робочих поверхонь. Таким чином, висока зносостійкість – найважливіша вимога, що пред'являється до характеристики інструментального матеріалу. Зносостійкість – це здатність інструментального матеріалу чинити опір при різанні видаленню його часток з контактних поверхонь інструменту. Вона залежить від твердості, міцності і теплостійкості інструментального матеріалу.

У промисловості використовується велика кількість інструменту, що вимагає відповідної витрати інструментального матеріалу. Інструментальний

матеріал має бути по можливості дешевим, не містити дефіцитних елементів, що не збільшуватиме вартість інструменту і, відповідно, вартість виготовлення деталей.

Процес обробки КМ абсолютно відрізняється від традиційних методів обробки металів [27]. Більше того, обробка композиту одного типу зазвичай відрізняється від обробки композиту іншого типу. В результаті фахівці, зайняті в обробці цих матеріалів, стикаються зі значними труднощами і з частою потребою у переоцінці використовуваних інструментів і методів обробки, а в деяких випадках устаткування і пристосувань.

Відмінність процесу обробки КМ різанням полягає в тому, що різальна кромка не утворює стружку за рахунок зрушення, як це відбувається з більшістю металів, вона ламає композиційний матеріал, зазвичай зрізаючи матрицю і при цьому руйнуючи армуючі волокна. Основні принципи обробки композитів полягають у використанні інструменту з дуже гострою різальною кромкою і достатнім заднім кутом для забезпечення чистого зрізу і зниження тертя поверхні різця по поверхні заготовки. Важливо мінімізувати знос, оскільки зміна геометрії різальної кромки призводить до швидкого і надмірного тепловиділення, руйнування кромки і зниження якості поверхні деталей.

У вуглепластика низька тепловіддача, а оскільки стружка не утворюється, то тепло неефективно відводиться із зони різання. Тому слід враховувати вплив температури як на різальний матеріал, так і на матеріал заготовки. Надмірні температури можуть привести до руйнування матриці композиту.

При обробці волокнистих КМ необхідно враховувати розміщення волокон в матриці, яке може бути перпендикулярним до ріжучої крайки або паралельним. Щоб отримати потрібну чистоту поверхні, необхідно добитися

прийнятних умов різання між шарами волокон і матриці в зв'язку з відмінністю властивостей складових КМ.

Одним з розповсюджених методів обробки елементів із ПКМ є свердління отворів під установку кріпильних елементів. При свердлінні спостерігаються похибки обробки, зокрема, вспучування, розшарування матеріалу, розтріскування між волокнами в шарах ПКМ, бахрома, відхилення форми отворів, припалення (внаслідок високої температури в зоні різання). В результаті, свердління отворів вимагає принципово нових технологічних рішень [28].

Конструктивно свердла виконуються суцільними, спіральними, кільцевими, трубчатими, ступінчастими, перфорованими, а також збірними інструментами, оснащеними непереточуваними пластинами з твердого сплаву.

Різновиди конструкцій свердел і КМ, що обробляються, спонукає розвиток на їх робочих поверхнях різноманітних процесів, до них належать наступні: абразивний, втомний, корозійно-механічний, захоплення, механо-хімічний.

Обробка шаруватих композитів, які складаються з листів, що чергуються, склеєних таким чином, щоб кожний наступний шар мав максимальну міцність в іншому напрямку, являє певну складність. Так, наприклад, при свердлінні шаруватого КМ на вході і виході отвору він може розколотися и навіть розпастися на окремі шари (розшаруватися).

Отримання отворів у композитах стає усе більш важким процесом, оскільки матеріали постійно розвиваються, щоб відповідати вимогам, які встановлюються при конструюванні нових літальних апаратів [29]. Вимоги, що пред'являються до якості отвору, досить високі. Водночас, постійно

підвищується необхідна міра автоматизації при одночасній тенденції до виключення допоміжних операцій.

Свердління вуглепластиків може відбуватися відносно просто, але коли до них додаються шари титану, то перехід від композиту до титану вимагає коригування режимів різання для того, щоби титанова стружка формувалася і транспортувалася не ушкоджуючи поверхню композиту. Зрозуміло, різальний інструмент має бути здатний обробити обидва типи цих дуже різних матеріалів. Свердління зазвичай здійснюють з швидкостями різання 100 - 200 м/хв при низьких подачах в основному 0,02 - 0,06 мм/об. Діаметр свердла при обробці композитів, як правило, 3 - 12,7 мм.

Використовувані рішення пов'язані з конкретним застосуванням і можуть включати одну з нової геометрії свердел CoroDrill® компанії Sandvik Coromant. CoroDrill 854 і 856 відповідають суворим вимогам по обробці новітніх вуглепластиків з алюмінієвими шарами, пропонуючи велику стійкість інструменту, що дозволяє довгий час забезпечувати обробку в межах жорстких допусків. Геометрія CoroDrill 854 покращує якість входу і виходу отвору в матеріалі з високим вмістом волокон.

Правильний вибір свердла дуже важливий для досягнення оптимальної якості, надійності процесу і зниження собівартості обробки отвору. Беручи це до уваги, геометрія CoroDrill 854 " з гострими кутами на периферії" переважна в тих випадках, коли можливі сколи або знос тертям, а геометрія CoroDrill 856 буде корисніша при можливості розшарування матеріалів з високим вмістом смол завдяки подвійному заточуванню свердла, що забезпечує м'який вхід і вихід.

Найбільш прийнятне рішення визначається простим економічним розрахунком. Швидкість знімання матеріалу важлива, але часто не є головним показником. При обробці композитів на продуктивність більше

впливає забезпечення необхідної якості отвору у поєднанні із стійкістю і вартістю інструменту. Наприклад, якщо отримати необхідну чистоту поверхні за одну операцію, то можна уникнути додаткових операцій, а підвищена стійкість інструменту дозволить скоротити час простою устаткування.

Технологічні процеси на базі механічної обробки лезовим інструментом характеризуються простотою реалізації, широким вибором ручного та автоматизованого обладнання, вибором типів РІ, різновидом спеціальних прийомів, що застосовуються для підвищення продуктивності та забезпечення якості. Перевагами технології механічної обробки КМ є простота її реалізації, відсутність специфічних вимог до обладнання, мобільність процесу, відносна дешевизна [30].

Причини та характер руйнування робочих поверхонь інструменту при обробці композиційних матеріалів. Неоднорідність фізико-механічних властивостей КМ викликає інтенсивне зношування інструменту в процесі механічної обробки. Наслідком цього є зміна первинних геометричних параметрів різальної частини інструменту, що призводить до зміни самого процесу різання. Інтенсивність спотворення геометрії різальної частини інструменту багато в чому визначається станом різальних крайок інструменту, що безпосередньо виконують різання КМ. Фактично якість і стійкість до руйнування різальних крайок, за умови правильного вибору значень технологічних параметрів обробки, визначають здатність інструменту виконувати свої функції.

До чинників, що визначають працездатність РІ, відносяться, в першу чергу, їх стійкість за показниками інтенсивності зношування і опірності викришуванню леза. Умови взаємодії інструменту і виробу при обробці

останньої значною мірою визначаються експлуатаційними і конструктивно-технологічними чинниками.

До основних експлуатаційних чинників відносяться: значення і закономірності прикладення навантаження; напруження, які діють в різальній частині; швидкість різання; температурний режим роботи інструменту; хімічна дія оброблюваного і інструментального матеріалів при різанні та ін. Особливістю силового вантаження інструментів за даних умов обробки є ударно-циклічний характер дії сил різання на РІ.

В результаті такого характеру взаємодії різального елемента з оброблюваним матеріалом в шарі, прилеглому до передньої поверхні різця, формується напруження розтягування, на величину яких значний вплив робить характер розподілу тисків по передній поверхні різця. Сили, що діють на задню поверхню різця, у декілька разів менші та не можуть істотно впливати на напруження в різальній частині.

У той же час ексцентриситет прикладання рівнодійних стискуючих сил на передню і задню поверхні невеликий і в різальній частині різця від дії цих сил може виникати тільки напруга стиску. Складаючись з більш небезпечною напругою розтягування на передній поверхні різця, ця напруга зменшує їх значення, що сприятливо відбивається на загальному напруженому стані різальної частини інструменту.

Дотична напруга, що виникає в різці, не може досягати високих значень, проте згідно з положеннями теорії міцності, мікротріщини втомі від їх дії можуть розвиватися по лініях зрушення в окремих зонах інструментального матеріалу.

Внаслідок виникнення значних навантажень на різальні кромки інструментів при обробці КМ спостерігається значна частота відмов РІ не

лише унаслідок зносу і мікрОВикришування, але і за рахунок об'ємного руйнування інструменту. Зокрема відбувається розрив полотен і виламування зубів через пікові навантаження і зниження запасу втомної міцності, появи тріщин втоми в западинах зубів і розриви полотен тощо.

Як вже відзначалося вище, РІ втрачає свою працездатність не лише внаслідок різних руйнувань, але і внаслідок досягнення граничного зносу різальних крайок, через що зносостійкість інструменту виявляється недостатньою для ефективної роботи.

При обробці КМ якісний прояв зношування робочих поверхонь інструментів може носити поступовий характер або виражатися у вигляді дискретного мікрОВикришування. Співвідношення поступового зносу і зносу мікрОВикришуванням залежить від умов експлуатації, властивостей оброблюваного і інструментального матеріалів та інших чинників.

Для управляючої дії, на складові зносу з метою підвищення зносостійкості необхідно впродовж процесу зношування здійснювати диференційовану оцінку чинників, що чинять найбільший вплив на затуплення різальної частини інструментів.

Викришування відбувається, коли напруження на кінці леза перевищує межу міцності інструментального матеріалу. Проте, напруження, що утворюється в різальній частині різця, відносно невелике і складає не більше 30% від межі міцності інструментального матеріалу. Тому в таких умовах на закономірності виникнення і поширення тріщин істотний вплив чинять особливості прикладання навантажень, рівень їх динамічності, зовнішній вплив середовища, дефектний стан поверхневих шарів, що призводять до виникнення небезпечного напруження при менших навантаженнях.

В основному, мікрОВикришування при різанні КМ виникає внаслідок невідповідності кутових параметрів різця умовам різання, об'ємної нерівноміцності окремих ділянок різальних крайок і прилеглих до них поверхонь внаслідок зниженої міцності меж зерен, невдалої орієнтації їх по відношенню до діючих навантажень, неоднорідності хімічного складу і структури, напруженого стану, макро- і мікронерівностей поверхонь, дефектів в матеріалі, а також дефектів що утворюються при заточуванні.

При цьому на початку виникають викришини малих розмірів і глибини, які в подальшій роботі збільшуються і перекривають ті, що спочатку утворилися. Різці з малими (1,6 - 3,0 мкм) радіусами скруглення різальної кромки найбільш схильні до мікрОВикришування. Оптимальний радіус округлення різальної крайки по енергоспоживанню і зносостійкості складає 5-7 мкм.

Істотний вплив на викришування різальної частини інструменту чинить мікрорельєф поверхонь, що її утворюють. Сліди механічної обробки є концентраторами напруження і значною мірою сприяють руйнівній дії динамічних навантажень. Так, risks від абразивних зерен шліфувального круга призводять до інтенсивного зношування леза.

Під час нагрівання і наступного охолодження в мікрооб'ємах інструментального матеріалу, характерних для здійснення процесу різання, відбуваються безповоротні структурні зміни, що проявляються найчастіше у вигляді утворення білих шарів, що мають високу зносостійкість, але відрізняються високою крихкістю. При малих кутах загострення леза така структура призводить до його обламування при перших же контактах з оброблюваним матеріалом. Особливо часто це відбувається при обробці гетерогенних високоміцних КМ, коли інструментальний матеріал під дією

активних середовищ окрихчується, а навантаження від сил різання і нерівномірність їх дії збільшуються.

Сили тертя, які залежать від діючих на різець навантажень, його кутових параметрів, радіусу округлення різальної крайки, мікрорельєфу і хвилястості контактуючих поверхонь, швидкості їх відносного переміщення, сприяють протіканню як механічного диспергування, так і прояву складних хімічних і електрохімічних явищ.

Періодичність процесу різання призводить до циклічності нагріву-охолодження різця. Це обумовлює появу термічної напруги в прикрайовій зоні, термовтомних тріщин в основному на передній поверхні, перпендикулярних різальній крайці. Пізніше утворюються тріщини, паралельні різальній крайці, після чого інструмент швидко втрачає свою працездатність внаслідок виникнення викришувань великих розмірів. Для деяких інструментальних матеріалів при дії 10^5 і більше циклів може відбуватися втомне викришування РІ. Збільшення тривалості проміжку між одиничними актами різання досліджуваних КМ призводить до деякого зниження температури леза. Проте при цьому досягається вища різниця температур в процесі контакту різця з КМ і після нього, що призводить до збільшення рівня термічної напруги в матеріалі різця.

За даними багатьох досліджень, головним чинником зношування різців при обробці КМ є механічне диспергування. Нагрів тонких поверхневих шарів різця призводить до окислювального зносу. Концентрація хімічних сполук може істотно підвищитися в результаті термічної і механічної деструкції, що призводить до адсорбційного пониження твердості поверхневих шарів, послабленню зв'язків між зернами і наступному видаленню їх при терті. Зношування в цьому випадку пояснюється дією

адгезійної і деформаційної складових в умовах взаємодії поверхнево-активних речовин з окисним шаром металу.

На затушення РІ значний вплив має хімічна складова КМ. Головна роль в механо-хімічному зношуванні сталевих лез відводиться продуктам термодеструкції КМ, які адсорбуються на робочих поверхнях РІ. Продукти деструкції викликають корозію леза, внаслідок чого зношування носить пітинговий характер і проявляється у вигляді мікрОВикришування зерен металу леза.

Знос інструменту посилюється при насиченні поверхневих шарів різальних елементів газами, що відбувається внаслідок контакту з ПКМ, які містять значну кількість водню, кисню, азоту та інших газів, вологи і розчинених кислот, а також термодеструкцією полімерної матриці при різанні.

Таким чином, важливо забезпечити доцільний вибір інструментального матеріалу у зв'язку з властивостями оброблюваних матеріалів, конструкційними особливостями і умовами роботи РІ.

Основна проблема, з якою стикаються всі користувачі спіральних свердл – розшарування КМ під впливом осьового навантаження. Для усунення цього недоліку застосовують свердла зі спеціальною геометрією та спеціальним підготуванням [31].

З метою підвищення якості обробки за рахунок зменшення ймовірності розшарування матеріалу та його сколювання, свердління здійснюють з накладанням ультразвукових коливань. При цьому продуктивність процесу збільшується в $2 \div 3$ рази, а стійкість інструменту підвищується в $1,5 \div 2$ рази.

Знос РІ може бути зменшений попередньо нанесенням зносостійких покриттів тільки у тому випадку, якщо спочатку в технологічний процес механічної обробки не закладені наступні механізми фатального руйнування матеріалу самого інструменту: пластична деформація, що виникає при неправильному підборі співвідношення навантаження на інструмент і твердості матеріалу інструменту; макросколювання, що виникає при неправильно підібраному співвідношенні навантаження і в'язкості (пластичності) інструменту; тріщиноутворення, що виникає в результаті невідповідності навантаження на інструмент його ударної в'язкості.

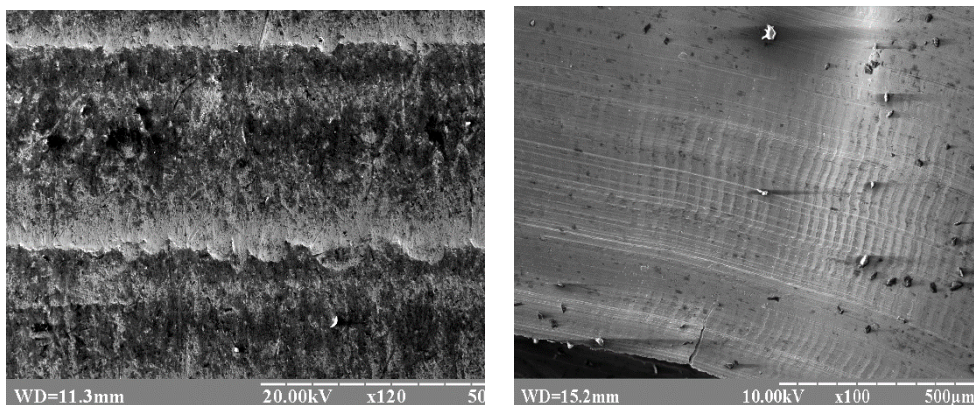
При обробці ПКМ інструментами звичайної і надвисокої твердості період катастрофічного зношування відсутній, тому що його завжди випереджає неприпустиме погіршення якості обробленої поверхні виробу. У цих випадках використовують критерії технологічного зносу. Інструмент є затупленим, коли лінійний знос задньої поверхні досягає значення, рівного технологічному зносу, якому відповідає технологічна ознака – погіршення якості обробленої поверхні. Для РІ, яким здійснюють технічну обробку полімерних матеріалів, більш об'єктивним показником зношення є округлення леза інструмента. При збільшенні радіуса округлення різко збільшується шорсткість обробленої поверхні і виникають тріщини. Незважаючи на те, що прийняття радіуса округлення як критерію зносу у виробничих умовах пов'язано із труднощами виміру припустимого розміру, цей параметр є найбільш об'єктивною характеристикою зношування інструмента. На чистових фінішних операціях розмір радіуса округлення не повинен перевищувати 1,0 мкм, на напівчистових операціях 10-15 мкм.

Вирішальний вплив на знос РІ має швидкість різання. Це пов'язано зі збільшенням теплоутворення в зоні обробки і активним протіканням

термодеструкції в зоні контакту ріжучого клину і матеріалу, що обробляється.

Таким чином, при обробці КМ найбільш поширеними видами зношування робочих поверхонь РІ є наступні: абразивне (рис. 1.2, *а*); втомне; корозійно-механічне; окислювальне, адгезійне.

При мікроаналізі ріжучого клину РІ видно тонкі полімерні плівки поблизу верхівки інструменту, що утворюються при високих швидкостях різання (> 100 м/хв) і більших перетинах зрізу. Полімерна плівка утворюється в результаті деструкції матеріалу, що обробляється, і призводить до значного викривлення радіусу скруглення, порушує процес стружкоутворення та якість поверхні виробу.



а

б

Рисунок 1.2 – Види зношування інструментального матеріалу при обробці композиційних матеріалів: *а*) абразивне зношування, *б*) втомне зношування

Знос інструменту є найважливішим показником його працездатності, проте фізична природа зношування вивчена на рівні гіпотез через виняткову складність контактних процесів, що протікають у зоні різання при обробці полімерних матеріалів.

Враховуючи важкооброблюємість КМ і складний вплив їх властивостей на знос і затуплення РІ, результати раніше проведених досліджень не дозволяють надійно визначити оптимальний рівень багатьох показників якості поверхневих шарів. Тому, для правильного вибору методів зміцнення і визначення умов їх використання, що дозволяють максимально продовжити термін служби інструменту, необхідно виявити механізм зношування РІ та можливості існуючих зміцнюючих технологій, а також перспективи їх адаптації стосовно інструментів для обробки КМ.

Висновок :Процес обробки КПМ значно відрізняється від механічної обробки різанням металу .

Тому для підвищення працездатності інструменту для ВПКМ , необхідно розробити концепцію управління контактною взаємодією у системі «інструмент-кимпозиційний матеріал» .

Визначити чинники які мають найбільший вплив на цей даний процес.

2 МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ УПРАВЛІННЯ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ІНСТРУМЕНТУ

2.1 Концепція управління процесами контактної взаємодії у системі “інструмент – композиційний матеріал”

Теорія контактної взаємодії на сьогодні досягла визначних успіхів, проте внаслідок математичних труднощів виникає деякий розрив між теорією і практичним використанням цих рішень для конкретних задач, зокрема для КМ, взаємодія з якими розглядається як неklasична задача.

Нами запропонована концепція управління процесами контактної взаємодії у системі «інструмент-композиційний матеріал», сутність якої полягає у наступному: якість обробленої поверхні КМ, яка визначається її геометричними параметрами і хіміко-фізико-механічним станом, залежить від ряду зовнішніх чинників, основними з яких є характеристики РІ та режими обробки (рис. 1.3) [44].

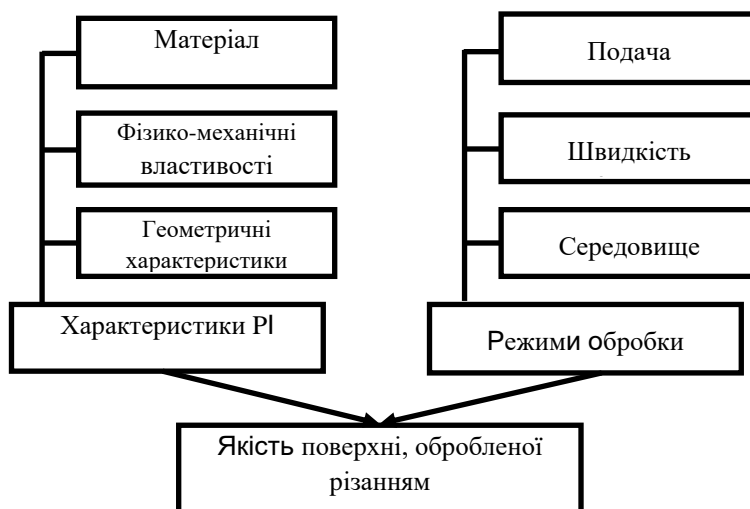


Рисунок 1.3 – Взаємозв’язок зовнішніх чинників та параметрів якості оброблених поверхонь полімерних композиційних матеріалів

Вплив на внутрішні процеси та явища, що розвиваються в контакті оброблюваний КМ – інструмент, можна розглядати як механізм управління

технологічним процесом та показниками якості оброблюваного матеріалу. Цей вплив пропонується здійснювати визначенням матеріалу та геометричних параметрів PI, видів покриттів і режимів механічної обробки

Операція свердління в механообработке є одним зі складних процесів різання, так як при її здійсненні на ріжучої кромці свердла навантаження і швидкість змінюються від мінімуму у осі свердла до максимуму на периферії ріжучої кромки, при цьому процес здійснюється в умовах обмеженого простору отворів .

Один із шляхів вдосконалення інструменту - можливість вирівнювання навантажень по довжині ріжучої кромки. До таких представників відносяться свердла з підрізаними ріжучими крайками (ПРК).

Конструкція цих свердел дозволяє перерозподілити в процесі різання товщину припуску між підрізаними і центральними ріжучими крайками (рис. 1) [3].

Формоутворення свердел такої конструкції підвищує трудомісткість заточки інструменту, однак при цьому істотно підвищується стійкість свердел і одночасно поліпшується якість обробки. У статті пропонуються дві схеми формоутворення суміжних площин свердла з ПРК, а також методика розрахунку геометрії ріжучої частини

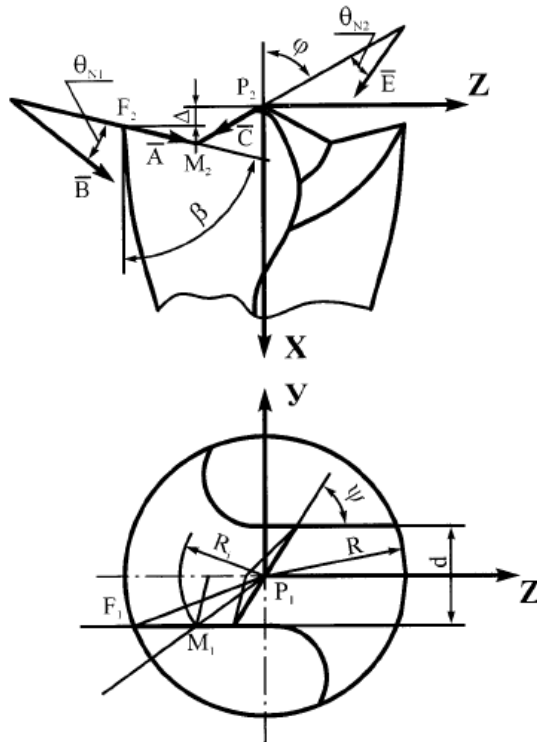


Рис.1.4 Геометрія свердла з підрізаними ріжучими крайками

Заточку свердла з ПРК виробляють з використанням універсально-заточний головки на універсально-заточний верстаті. Головка дозволяє заточувати інструмент орієнтувати по трьох взаємно перпендикулярних осях X, Y, Z (рис. 2).

Пропоновані схеми формоутворення суміжних площин свердла представлені на рис. 3.

Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології

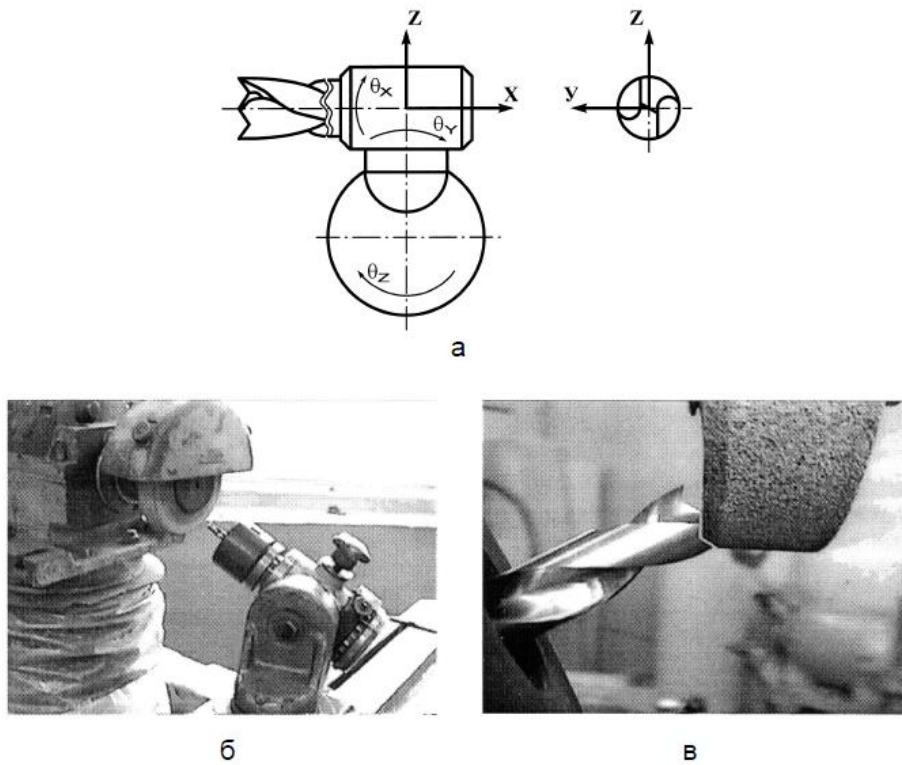


Рис.1.5 Заточка свердел з підрізнаними крайками:
а - схема заточування; б - верстат і універсальна заточувальні головка;
в - заточка свердла

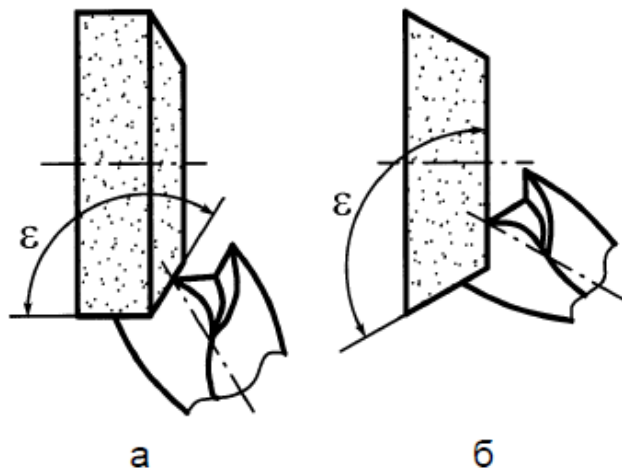


Рис. 1.6. Схема формоутворення підрізати і центральної різальних крайок:
а - заточка центральної ріжучої кромки фасонної частиною кола;
б - заточення торцем круга

Для кожної зі схем заточування пропонується наступний узагальнений алго-

ритм розрахунку кутів установки універсально-заточний головки $\theta_X, \theta_Y, \theta_Z$ при од-

новременно заточування задніх суміжних площин підрізати і центральної різальних крайок свердла Σ_1 і Σ_2 .

Спочатку визначаються:

вектор A , що йде уздовж підрізав ріжучої кромки:

$$\bar{A} = \bar{i} + \bar{k} \operatorname{tg} \beta;$$

вектор B , що йде по задній площині Σ_1 в нормальному до підрізав ріжучої кромки перетині:

$$\bar{B} = \bar{i} \sin \beta + \bar{j} \operatorname{ctg} \theta_{N1} - \bar{k} \cos \beta;$$

вектор C , що йде уздовж центральної ріжучої кромки:

$$\bar{C} = \bar{i} - \bar{k} \cdot \operatorname{tg} \varphi;$$

вектор E , що йде по задній площині Σ_2 в нормальному до різальної кромки перетині:

$$\bar{E} = \bar{i} \sin \varphi + \bar{j} \operatorname{ctg} \theta_{N2} + \bar{k} \cos \varphi;$$

вектор нормалі N_1 до задньої площини Σ_1 :

$$\bar{N}_1 = [\bar{A} \times \bar{B}] = -\bar{i} \sin \beta \operatorname{ctg} \theta_{N1} + \bar{j} + \bar{k} \operatorname{ctg} \theta_{N1} \cos \beta;$$

вектор нормалі N_2 до задньої площини Σ_2 :

$$\bar{N}_2 = [\bar{C} \times \bar{E}] = \bar{i} \sin \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2} + \bar{j} + \bar{k} \operatorname{ctg} \theta_{N2} \cos \varphi;$$

вектор L , що йде по лінії перетину площин Σ_1 и Σ_2

$$\bar{L} = [\bar{N}_1 \times \bar{N}_2] = \bar{i} L_x + \bar{j} L_y + \bar{k} L_z,$$

де

$$L_x = \operatorname{ctg} \theta_{N2} \cos \varphi + \operatorname{ctg} \theta_{N1} \cos \beta;$$

$$L_y = \operatorname{ctg} \theta_{N1} \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin(\varphi + \beta);$$

$$L_z = \sin \beta \operatorname{ctg} \theta_{N1} - \sin \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2}.$$

Кут ε між площинами Σ_1 і Σ_2 обмежується нормаллями N_1 , N_2 і визначається за формулою

$$\cos \varepsilon = \frac{(\overline{N_1} \cdot \overline{N_2})}{|\overline{N_1}| \cdot |\overline{N_2}|} = \cos \theta_{N_1} \cos \theta_{N_2} \cos(\varphi + \beta) - \sin \theta_{N_1} \sin \theta_{N_2}.$$

У разі, коли кут ε між суміжними площинами Σ_1 і Σ_2 дорівнює 90° , за-
точку виробляють стандартним шліфувальним кругом, що виключає процес
його
правки.

Для випадків заточування за схемою «А» і «Б» кут профілю заточного круга
визначається за такою залежністю:

$$\cos \varepsilon = \cos \theta_{N_1} \cdot \cos \theta_{N_2} \cdot \cos(\varphi + \beta) - \sin \theta_{N_1} \cdot \sin \theta_{N_2}.$$

Звідси

$$\cos(\varphi + \beta) = \frac{\cos \varepsilon + \sin \theta_{N_1} \cdot \sin \theta_{N_2}}{\cos \theta_{N_1} \cdot \cos \theta_{N_2}}.$$

Розглядаючи представлену залежність, можна зробити висновок про те,
що для запропонованого способу заточування свердел з ПРК при обраних
значеннях

інструментальних задніх кутів θ_{N_1} і θ_{N_2} можна незалежно вибирати
величини

геометричних параметрів ріжучої частини $(\varphi + \beta)$. Для обраних визначається

сума кутів $(\varphi + \beta)$: $\operatorname{ctg}(\varphi + \beta) = \frac{\sin \theta_{N_1} \cdot \cos \theta_{N_2} + \cos \theta_{N_1} \cdot \sin \theta_{N_2}}{\cos \theta_{N_1} \cdot \cos \theta_{N_2}}$. Потім, знаючи суму кутів

$(\varphi + \beta)$ вибирають величину одного з кутів φ або β .

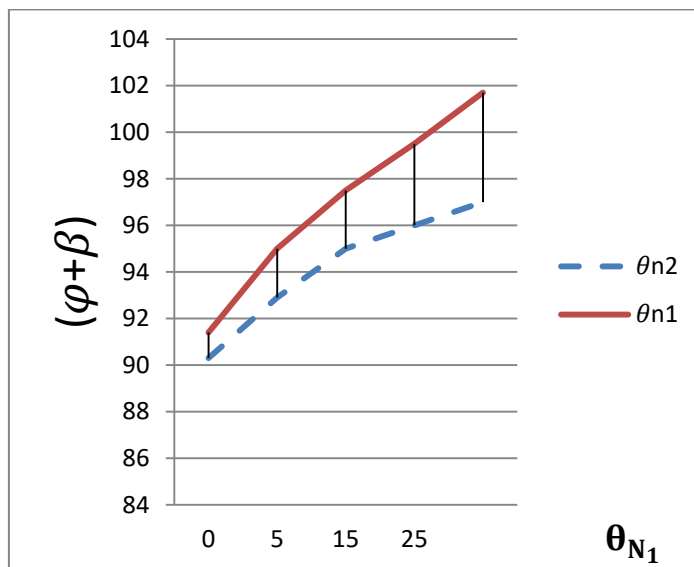


Рис .1.7 Графік залежності кутів заточки ріжучої кромки свердла від інструментальних кутів θ_N

На рис. 4 представлений графік залежності кутів заточки ($j + b$) від інструментальних кутів $N q$

Методика визначення кутів повороту головки за схемою заточки «А»:

- поворотом навколо осей X і Y заточувати площину $\Sigma 1$ встановлюється в горизонтальне положення, а нормаль $1 N$ до неї займає вертикальне положення;

- при розташуванні таким чином площині $\Sigma 1$, визначається вектор L , що йде по лінії перетину заточуваних задніх площин;

- поворотом навколо осі Z вектор L наводиться в положення, паралель-ве поздовжньої подачі стола, і після цього проводиться заточка свер-ла.

Кути установки головки і кут профілю абразивного круга розраховуються

в такій послідовності

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_X &= \operatorname{ctg} \theta_{N1} \cos \beta; \\ \operatorname{tg} \theta_Y &= -\operatorname{ctg} \theta_{N1} \sin \beta \cos \theta_X; \\ \operatorname{tg} \theta_Z &= \frac{L_X \cos \theta_Y - L_Y \sin \theta_Y \cos \theta_X - L_Z \sin \theta_Y \sin \theta_X}{L_Y \sin \theta_X - L_Z \cos \theta_X}, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} L_X &= \operatorname{ctg} \theta_{N2} \cos \varphi + \operatorname{ctg} \theta_{N1} \cos \beta; \\ L_Y &= \operatorname{ctg} \theta_{N1} \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin(\varphi + \beta); \\ L_Z &= \operatorname{ctg} \theta_{N1} \sin \beta - \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin \varphi. \end{aligned}$$

Методика визначення кутів повороту головки за схемою заточки «Б»:

- поворотом навколо осей X і Y заточувати площину $\Sigma 2$ устанавлюється в положення, перпендикулярне площині столу верстата;
- поворотом навколо тих же осей X і Y вектор L, що йде по лінії пересічення заточуваних площин $\Sigma 1$ і $\Sigma 2$, встановлюється в горизонтальному положення щодо площини столу верстата, при цьому проекція

L вектора L на вісь Y дорівнюватиме нулю, два рівняння $0 = N$ і

$L \cdot O \cdot Y =$ визначають кути повороту X і Y;

- поворотом навколо вертикальної осі Z на кут Z φ вектор L, що займає горизонтальне положення, встановлюється в положення, паралельно напрямку поздовжньої подачі стола верстата; при цьому проекції нормалі $0 = N$ на осі X і Z буде дорівнює нулю.

Кути установки універсальної головки і кут профілю кола розраховують

за такими формулами:

$$\operatorname{tg} \theta_X = \frac{L_X + L_Y \cdot \sin \varphi \cdot \operatorname{ctg} \theta_{N2}}{\operatorname{ctg} \theta_{N2} \cdot (L_X \cdot \cos \varphi - L_Z \cdot \sin \varphi)},$$

де L_X, L_Y, L_Z - координати вектора L;

$$\begin{aligned}L_X &= \operatorname{ctg} \theta_{N2} \cos \varphi + \operatorname{ctg} \theta_{N1} \cos \beta ; \\L_Y &= \operatorname{ctg} \theta_{N1} \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin(\varphi + \beta) ; \\L_Z &= \operatorname{ctg} \theta_{N1} \sin \beta + \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin \varphi .\end{aligned}$$

Визначаємо кут повороту θ_X :

$$\operatorname{tg} \theta_X = \frac{L_X \operatorname{ctg} \theta_{N2} + L_X \sin \varphi}{L_X \cos \varphi - L_Z \sin \varphi} ;$$

кут повороту θ_Y :

$$\operatorname{tg} \theta_Y = \frac{\cos \theta_X - \cos \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin \theta_X}{\sin \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2}} ;$$

кут повороту θ_Z :

$$\operatorname{tg} \theta_Z = \frac{-\sin \theta_X - \cos \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2} \cos \theta_X}{\cos \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2} \sin \theta_Y \sin \theta_X - \sin \theta_Y \cos \theta_X - \sin \varphi \operatorname{ctg} \theta_{N2} \cos \theta_Y} .$$

Розглянутий спосіб заточування свердел з ПРК має перевагу, за-

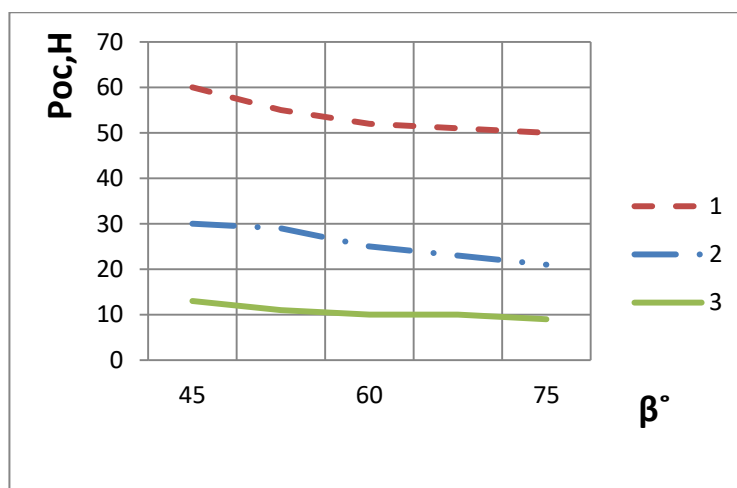
полягають в можливості застосування стандартних шліфувальних кругів, що спрощує процес редагування кругів.

2.2 Методика та обладнання досліджень силових характеристик

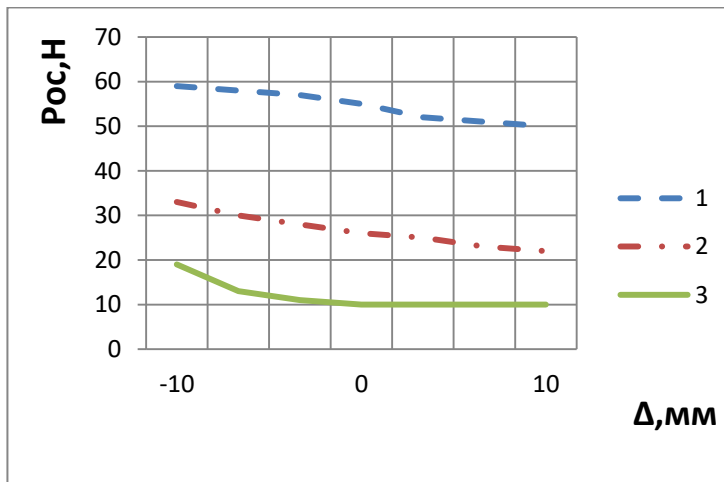
Дослідження силових залежностей проводилося з метою визначення впливу різних геометричних параметрів свердел з ПРК на осьове зусилля і крутний момент, тому що по ним можна судити про працездатність свердел і «прогнозувати» стійкість. В процесі випробувань свердлили наскрізні отвори без застосування МОР, на заготовках зі склопластику основа тканина Т1014, - 5-211-БН, схема укладання - 0 ... 90 °. Товщина заготовок становила 3 ... 5 мм, випробування проводилися на вертикально-свердильному верстаті з ЧПУ-2К13502, верстат відповідав встановленим нормам точності і

жорсткості. Для проведення випробувань використовувалися заготовки однієї партії свердел $\varnothing 5$ мм зі сталі Р6М5К5. При проведенні експериментів допускався знос по задніймежі не більше 0,25 ... 0,3 мм і контролювалося якість обробленої поверхні, не допускалися спучування більше 0,3 ... 0,5 мм і квалітет точно не ніж Н10.

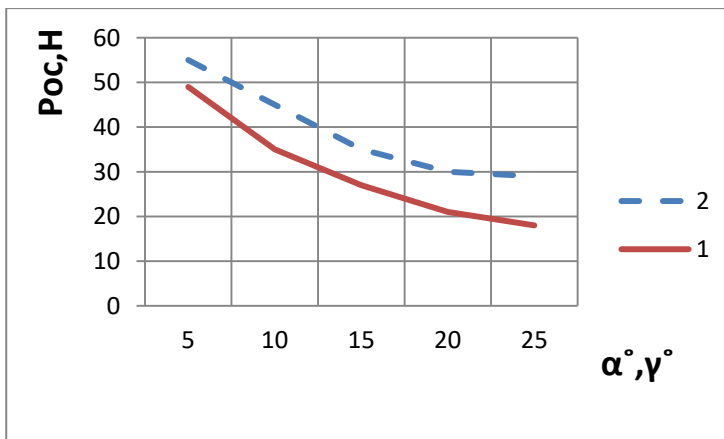
Щоб виключити можливість утворення відколів на виході свердла з отворів, при установці заготовок у пристроях використовувалися підкладки, які просверлювались разом із заготівлею. За результатами експериментальних даних були побудовані графіки завиності осьових сил P_{oc} і крутять моментів $M_{кр}$ від таких технологічних па-раметров процесу різання: діаметр свердла d ; кут нахилу зовнішньої підрізаючої ріжучої кромки b ; передніх g і задніх a кутів ріжучої кромки; величину перевищення центральної ріжучої кромки щодо вершини свердла D_i від величини подачі. o S На рис. 5, 6 і 7 побудовані графіки залежностей P_{oc} і $M_{кр}$ від технологічних параметрів, при яких вони проводилися.



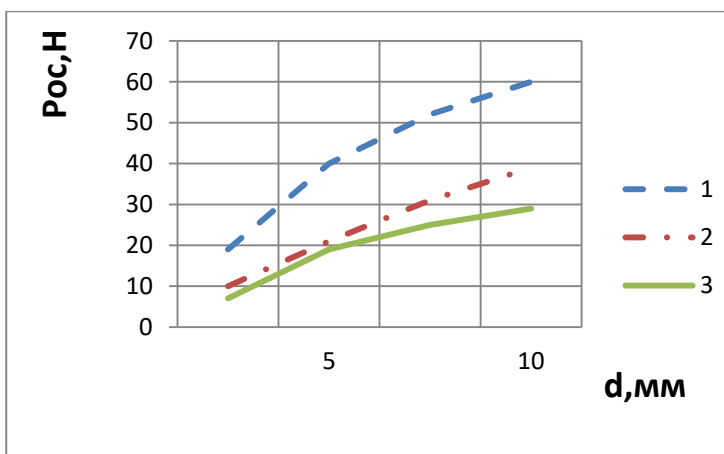
а) Графік залежності осьових сил P_{oc} від :Кута β



б) Графік залежності осьових сил $P_{ос}$ від : перевищення Δ (б)



в) Графік залежності осьових сил $P_{ос}$ від : переднього кута γ (в, 1); заднього кута α (в, 2)



г) Графік залежності осьових сил $P_{ос}$ від : діаметра свердла d (г),

де 1 - склопластик; 2 -вуглепластик; 3 -органопластик

Графік залежності осьових сил P_{oc} від :

Кута β (а), перевищення Δ (б), при

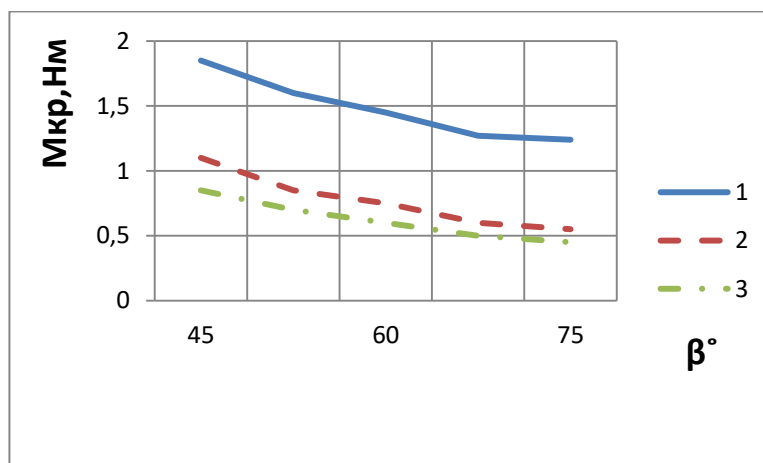
$$o - S_o = 0,05 \frac{MM}{o\delta}, \Delta - S = 0,10 \frac{MM}{o\delta}, \square - S_o = 0,2 \frac{MM}{o\delta}, V = 6,5 \frac{M}{мин};$$

переднього кута γ (в, 1); заднього кута α (в, 2), при

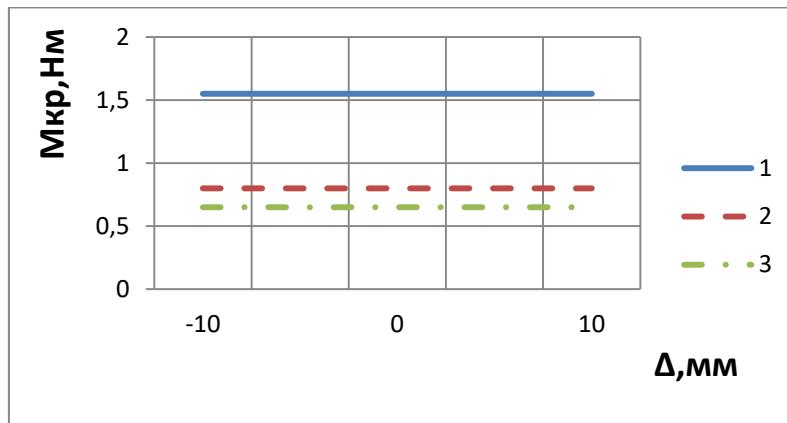
$$S_o = 0,10 \frac{MM}{Q\delta}; V = 6,5 \frac{M}{мин}$$

діаметра свердла d (г), де 1 - склопластик; 2 -вуглепластик; 3 -
органопластик, при

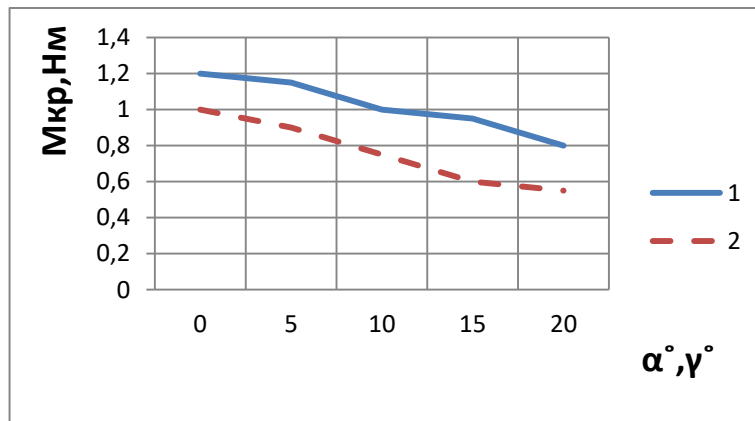
$$S_o = 0,10 \frac{MM}{o\delta}; V = 6,5 \frac{M}{мин}$$



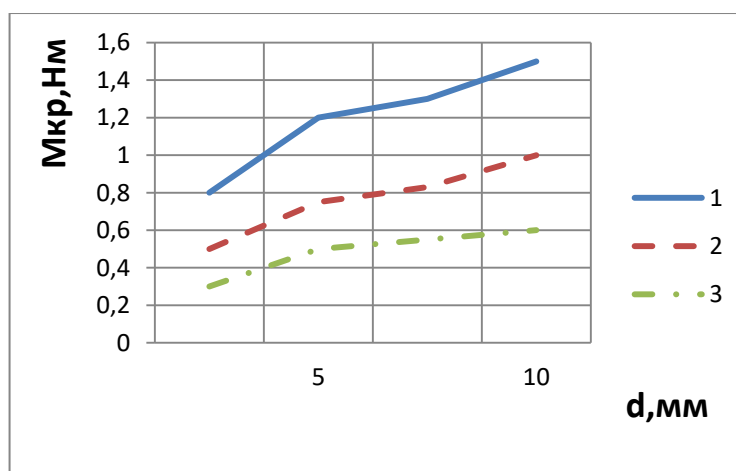
а) Графік залежності крутного моменту від :Кута β



б) Графік залежності крутного моменту від : перевищення Δ



в) Графік залежності крутного моменту від : переднього кута γ (в, 1); заднього кута α (в, 2)

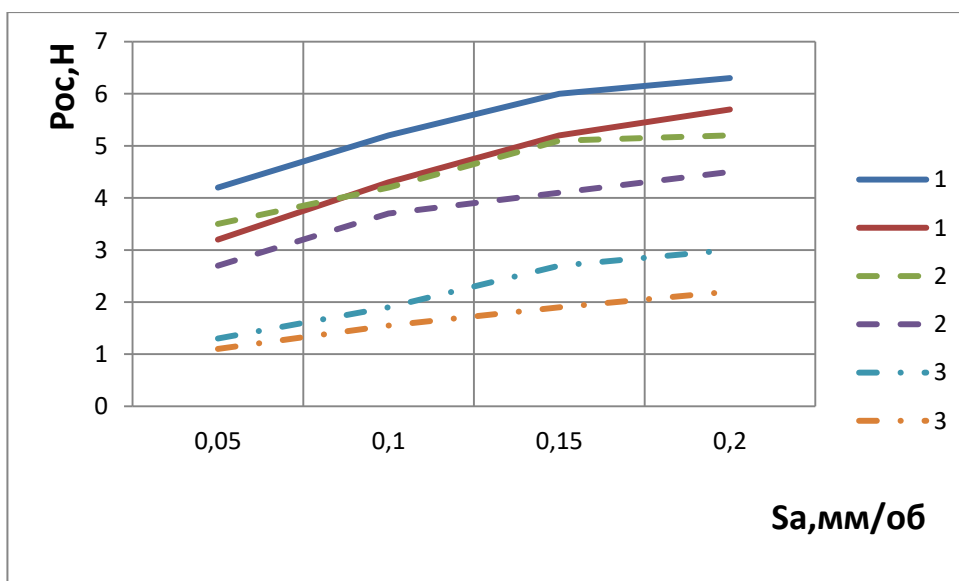


г) Графік залежності крутного моменту від : діаметра свердла d , де 1 - склопластик; 2 - вуглепластик; 3 -органопластик

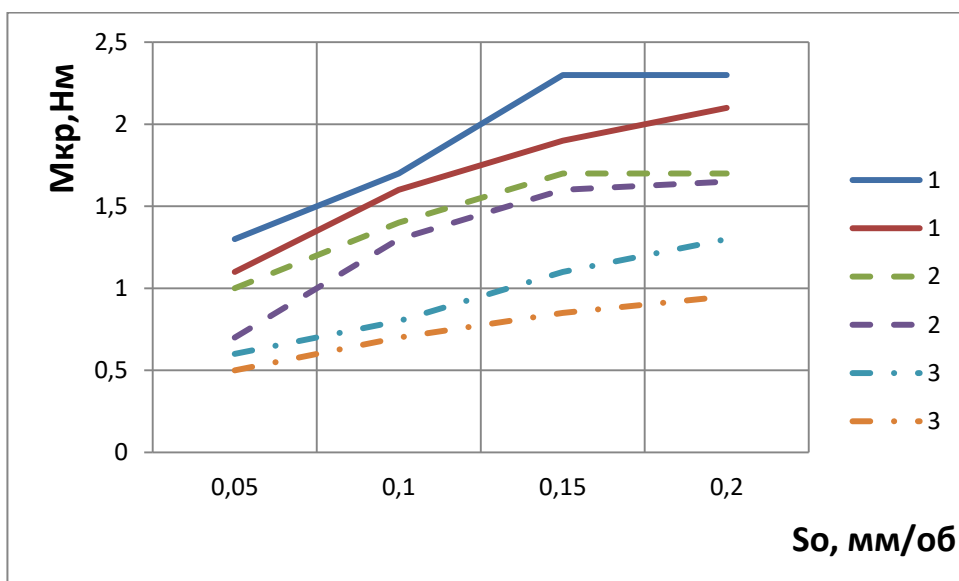
Графік залежності крутного моменту від :

Кута β (а), перевищення Δ (б), при

$$o - S_o = 0,05 \frac{\text{мм}}{\text{об}}; \Delta - S = 0,10 \frac{\text{мм}}{\text{об}}; \square - S_o = 0,2 \frac{\text{мм}}{\text{об}}; V = 6,5 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$$



а) Осьової сили P_{oc} від подачі S_a



б) крутного моменту $M_{кр}$ від подачі S_o

Графік залежності

а - осьової сили P_{oc} і б - крутного моменту $M_{кр}$ від подачі S_o ,

де 1 - склопластик; 2 - вуглепластик; 3 – органопластик

Аналіз представлених графіків осьових сил і моментів, що крутять дозволяє зробити висновки про те, що найбільший вплив на величину цих сил викликають діаметр свердла d , кути заточування γ, α , а і величина подачі свердла S . Характеризує ступінь впливу кожного окремо взятого технологічного параметра на силові залежності, можна сказати, що зі збільшенням діаметра свердла відбувається пропорційне зростання сил приблизно до діаметра 10 мм з збільшенням діаметра, вплив пропорційності знижується. це виправдано тим, що зі збільшенням діаметра зростає ступінь впливу перерозподілу товщини знімається припуску матеріалу між підрізаними і центральними ріжучими крайками свердла. Збільшення кутів заточення ріжучих кромок γ° та α° а знижує сили різання. Зниження спостерігається до величини о 15 ... 20, в Надалі зусилля стабілізуються. Це пояснюється впливом пружності матеріалу КМ і зниженням сил тертя по задній поверхні інструменту. Зі збільшенням подачі свердла о S сили різання збільшуються. це тим, що зі збільшенням подачі збільшуються площа зрізу і обсяг знятого матеріалу.

Вплив кута нахилу β і перевищення центральної ріжучої кромки Δ не роблять значного впливу на сили різання і крутний момент. Зниження сил різання P_{oc} і крутного моменту $M_{кр}$ від кута нахилу підрізав ріжучої кромки b пояснюється зниженням обсягу зрізаного матеріалу.

Висновки

Запропоновано нові способи заточування свердел з підрізаними ріжучими кромками і наведено методику розрахунку кутів установки свердла на універсально-заточний верстаті з використанням заточної головки.

Для свердел з підрізаними ріжучими крайками найбільше вплив на осьові сили і крутний момент надають величина діаметра, кути заточування по ріжучої кромці і величина подачі.

Порівняльні дані продуктивних випробувань свердел з швидкорізальних сталей і твердого сплаву з урахуванням продуктивності вартісних витрат на інструмент показують, що кращими є свердла з Р6М5К5.

3 МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБОВУВАНЬ.

Випробування ПКМ проводили в умовах тертя ковзання без мастильного матеріалу і абразивного зношування.

Триботехнічні характеристики у першому випадку визначалися на машині тертя [46], схема вузла тертя якої зображена на рис. 1.8.

Вузол тертя машини складається з корпусу 6, усередині якого на підшипниках встановлено основний вал. Співвісно з валом на підшипниках, встановлених на корпусі, змонтовано каретку, що гойдається 5. На торці каретки закріплено важільну систему навантаження 2. Досліджуваний зразок 3 із тримачем зразка встановлено на рухомому важелі системи навантаження.

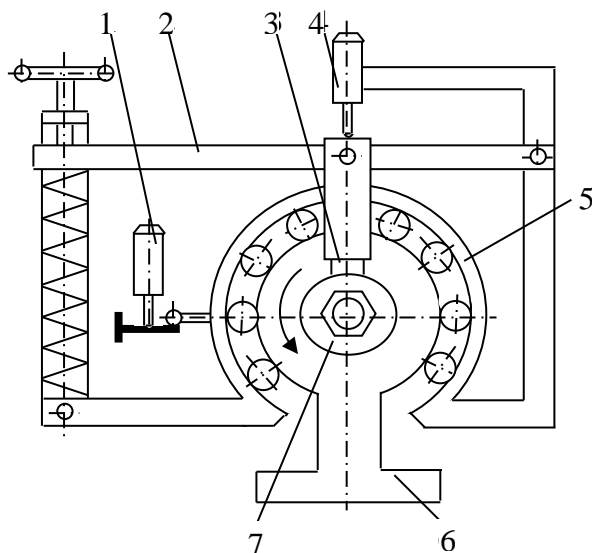


Рисунок 1.8 – Схема вузла тертя установки: 1 – датчик сили тертя із динамометричною пружиною; 2 – важільна система навантаження; 3 –

зразок, що досліджується; 4 – датчик лінійного зношування; 5 – каретка, що гойдається; 6 – корпус; 7 – ролик – контртіло

Контртіло 7 у вигляді змінного ролика встановлено на основному валі, привід якого здійснюється через клиноремінну передачу зі змінними шківками. Пружина притискає зразок до зовнішньої циліндричної поверхні контртіла, при обертанні якого сила тертя, що утворюється від цього, прагне повернути зразок та пов'язану з ним каретку навколо вісі. Повертання каретки перешкоджає динамометрична пружина, протарована по величині сили тертя F_{TP} . Співпадання вісі валу з віссю гойдання каретки забезпечує збереження контакту зразка та контртіла при повертанні каретки.

Дослідження проводилися у таких умовах: мастильне середовище відсутнє; зусилля притискання – 100...400 Н; швидкість ковзання – 0,4 м/с; шлях тертя – 1000 м.

Зразки розміром 5×10×10 мм з різних ПКМ (Zellamid 900 (ПОМ – поліоксиметилен); Zellamid 202 МО (ПА6 + MoS₂ – поліамід (нейлон) 6, модифікований дисульфідом молибдену); ПЕ-1000 Polystone М (надвисокомолекулярний поліетилен); Sustadur PET GLD 130 (поліетилентерефталат)) притискалися до роликів-контртіл діаметром 40 мм зі сталі 45 (ГОСТ 1050-74), термообробленої до твердості 50...52 HRC. Робоча поверхня контртіла після шліфування мала шорсткість $R_a = 0,25...0,35$ мкм.

Контакт пари тертя відбувався за схемою “диск-колодка”. Для цього робочі поверхні зразків виконувалися у формі угнутого циліндра діаметром 40 мм.

У процесі досліджень за допомогою електронної вимірювальної системи

моделі 217 з індуктивними датчиками переміщень моделей 234–М безперервно вимірювалася та реєструвалася сила тертя F_{TP} . Коефіцієнт тертя розраховувався як частка від ділення сили тертя F_{TP} на зусилля притискання P .

Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів розраховували вагову інтенсивність зношування в кг/см^2 на 1000 м шляху тертя. Зважування проводилося на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Перед зважуванням зразки промивали бензином Б-70 та просушували.

Випробування на абразивне зношування проводили на установці (рис. 1.9), яка використовується для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів

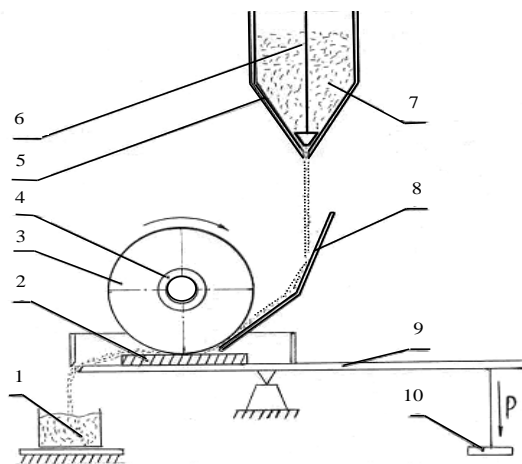


Рисунок 1.9 – Схема експериментального обладнання Бринеля - Хаворта.

1 – бункер для збирання відпрацьованого абразиву; 2 – зразок матеріалу, що досліджується; 3 – циліндр, що обертається; 4 – втулка для циліндру; 5 – бункер для вільного абразиву; 6 – важіль для регулювання швидкості подачі абразиву; 7 – вільний абразив; 8 – лоток для подачі абразиву; 9 – важіль для регулювання зусиль притискування циліндру до тертьової поверхні з абразивом; 10 – навантаження важеля силою P

покриттів при терті в умовах нежорстко закріплених абразивних частинок (ГОСТ 23.20879) [47] в середовищі кварцевого піску (SiO_2) зернистістю 120-160

мкм. Знос визначали ваговим методом на електронних вагах з точністю до 0,0001 г, а також за шириною сліду, що утворився в процесі зношування.

Сутність методу заключається у наступному. Зразок, що досліджується 2, розміром 30X30 мм і товщиною 4 мм з нанесеним покриттям, прижимався резиновим роликом з діаметром 50 мм. Коли ролик крутиться, то в зону контакту подаються тверді абразивні частинки 7 із бункера 5. Зусилля притискання регулювалось за допомогою важеля 9 і навантаження 44,1 Н випробуванням зразки промивали у спирті, висушували і зважували.

3.1. Результати випробувань в умовах абразивного зношування

Аналіз результатів проведених випробувань на абразивне зношування у середовищі кварцевого піску (SiO_2) зернистістю 0,5 (рис. 3.1) показав, що для

матеріалу ПЕТ характерним є незначне поступове збільшення зносу до значення шляху тертя 150 м, а потім – різке зростання зносу у 2,5 разу на шляху тертя 200 м. Причиною такої трибологічної поведінки ПЕТ очевидно можуть бути процеси механо- та термодеструкції, які відбуваються у поверхневому шарі матеріалу при збільшенні часу випробувань і призводять до схоплювання.

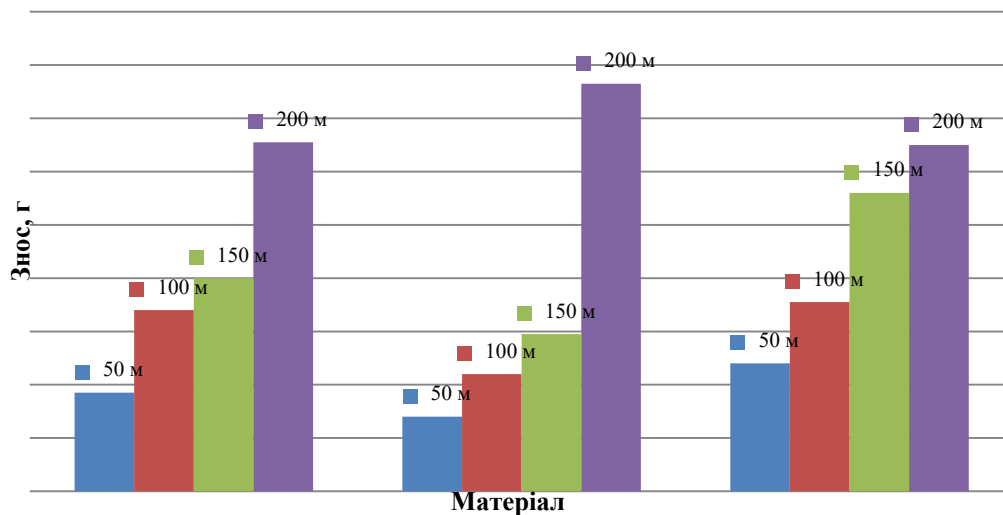


Рисунок 3.1 – Результати випробувань на абразивне зношування у середовищі кварцевого піску (SiO_2) зернистістю 0,5: 1– Sustamid 6G; 2 – ПЕТ; 3 – Sustapeek natural

Для матеріалу Sustamid 6G величина зносу на шляху тертя 50 м є дещо більшою, ніж у ПЕТ, зростання на 100 м є більш інтенсивним і до більших значень (0,0067 г у Sustamid 6G проти 0,0044 г у ПЕТ), однак на шляху тертя 200 м знос зростає менш інтенсивно і до менших значень (0,0131 г у Sustamid 6G проти 0,0153 г у ПЕТ).

Трибологічна поведінка матеріалу Sustapeek natural для даних умов випробувань відрізняється більш рівномірним та плавним зростанням зносу із збільшенням шляху тертя порівняно із першими двома матеріалами.

Взагалі, можна зазначити, що максимально зносостійким матеріалом для даних умов випробувань на шляху тертя 50 м є ПЕТ, а для 200 м – Sustamid 6G та Sustapeek natural. Нерівномірність зростання величин зносу при однаковому збільшенні часу випробувань для різних композиційних матеріалів свідчить про вплив структурно-фазового складу поверхневих шарів на процеси тертя та зношування.

Результати випробувань на абразивне зношування у середовищі оксиду алюмінію (Al_2O_3) (рис. 3.2) дозволили виявити аналогічні тенденції:

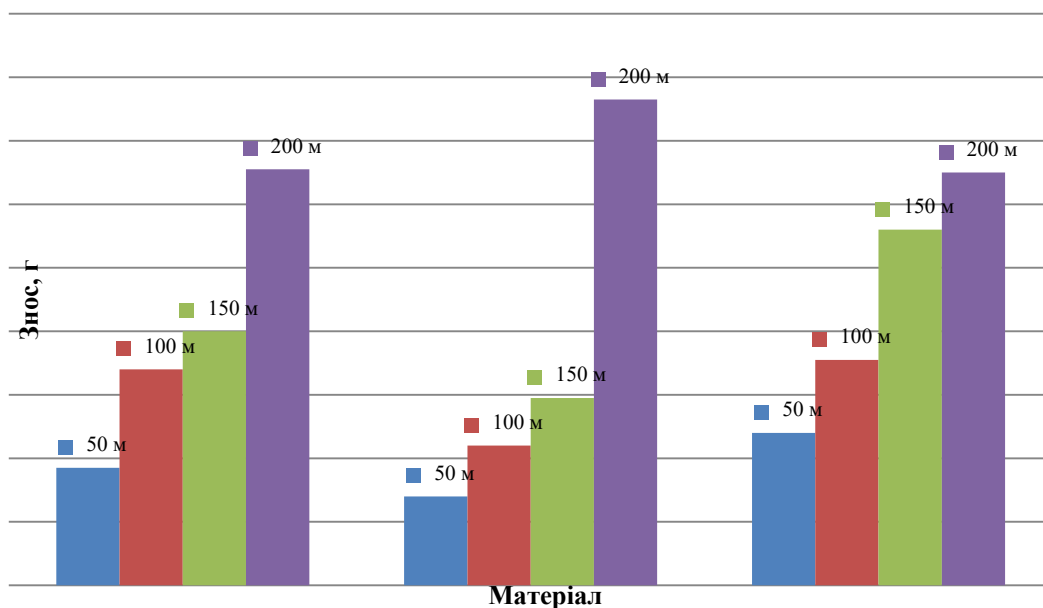


Рисунок 3.2 – Результати випробувань на абразивне зношування у середовищі оксиду алюмінію (Al_2O_3): 1– Sustamid 6G; 2 – ПЕТ; 3 – Sustapeek

незначне поступове збільшення зносу матеріалу ПЕТ до значення шляху тертя 150 м, а потім – різке зростання зносу у 2,6 разу на шляху тертя 200 м;

більша, ніж у ПЕТ величина зносу матеріалу Sustamid 6G на шляху тертя 50 м, більш інтенсивне і значне зростання його на 100 м, проте менш інтенсивне і менш значне – на шляху тертя 200 м;

найбільш рівномірне зростання величини зносу при збільшенні часу випробувань для матеріалу Sustapeek natural;

максимально зносостійким матеріалом для даних умов випробувань на шляху тертя 50 м є ПЕТ, а для 200 м – Sustamid 6G та Sustapeek natural.

Випробування на абразивне зношування у середовищі карбіду бору (B_4C) (рис. 2.3) показали збереження виявлених вище закономірностей.

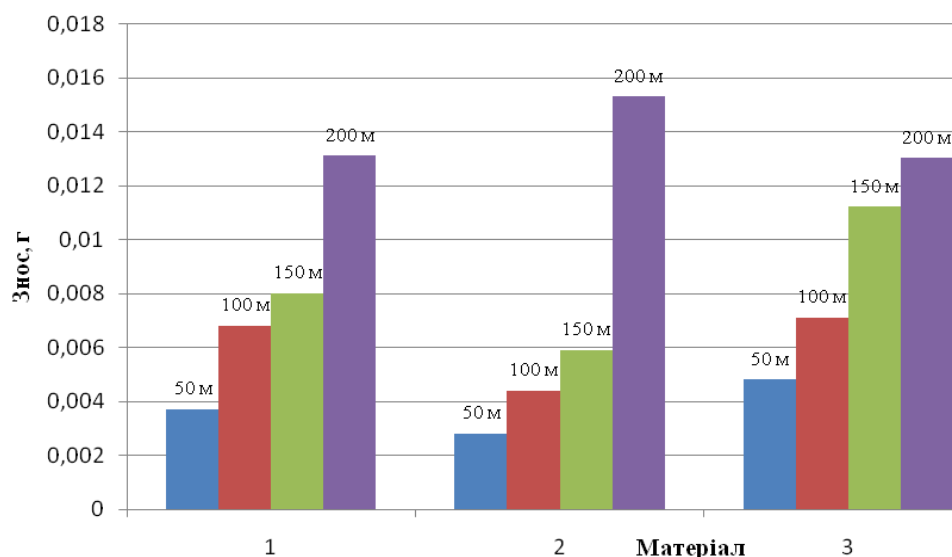


Рисунок 2.3 – Результати випробувань на абразивне зношування у середовищі карбіду бору (B_4C): 1– Sustamid 6G; 2 – PET; 3 – Sustapeek natural.

Випробування в умовах тертя ковзання без мастильного матеріалу проводилися для чотирьох матеріалів протягом 15 хв. (за питомих навантажень 1 МПа та 2 МПа) та 30 хв. (за питомих навантажень 1 МПа).

Аналіз отриманих результатів (рис. 2.4) дозволив зробити такі висновки: найкращу зносостійкість при часі випробувань 15 хв. і навантаженнях 1 та 2 МПа показав матеріал Sustapeek natural, а при часі випробувань 30 хв. і навантаженні 1МПа - Sustamid 6G;

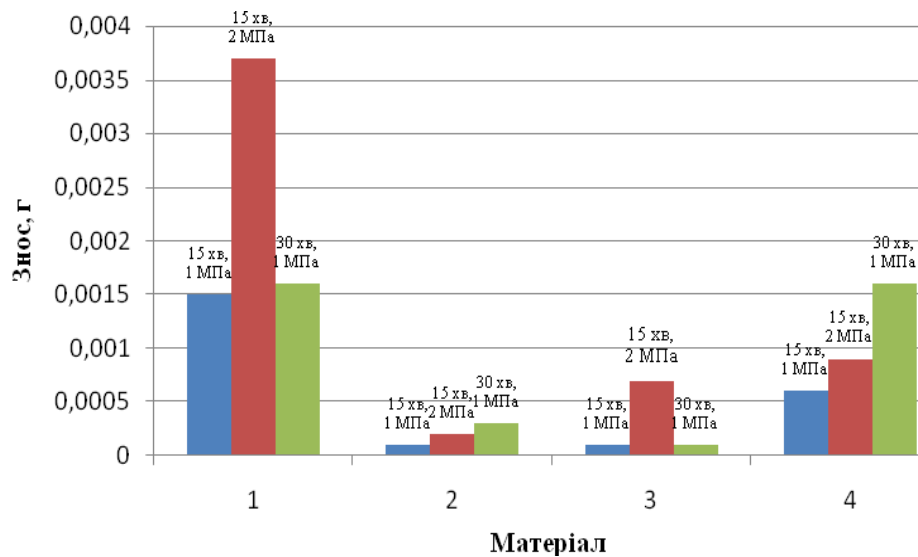


Рисунок 3.4 – Результати випробувань в умовах тертя ковзання без мастильного матеріалу: 1– Sustadur PET; 2 – Sustapeek natural; 3 — Sustamid 6G; 4 – Sustarin C.

найгіршими показниками зносостійкості володіє матеріал Sustadur PET, величини зносу якого є у 5,5...18 разів більшими, ніж у Sustapeek natural; збільшення питомого навантаження з 1 до 2 МПа при однаковому часі випробувань у всіх випадках призводить до збільшення зносу в 2,3...7,3 разу, причому найбільш явно це проявляється для матеріалу Sustamid 6G;

збільшення часу випробувань з 15 до 30 хв. за однакового навантаження 1МПа для матеріалів Sustadur PET та Sustamid 6G майже не впливає на величину зносу, а для Sustapeek natural та Sustarin C навпаки – знос зростає приблизно у 2,5 разу. Таку різницю у трибологічній поведінці досліджуваних матеріалів можна пояснити впливом структурного складу їх основи та наповнювачів на час припрацювання.

3.2 Методика визначення оптимальних режимів механічної обробки композиційних матеріалів. Важливість рішення завдань визначення оптимальних режимів механічної обробки КМ не викликає сумнівів. Пошук оптимальних рішень передбачає наявність: математичної

моделі, алгоритму рішення, вихідних даних. Якщо модель описує залежність між вихідними даними й шуканими величинами, то алгоритм являє собою послідовність дій, які необхідно виконати, щоб перейти від вихідних даних до шуканих величин. Оптимальним методом обробки є таке сполучення глибини, подачі й швидкості різання, а також геометричних параметрів різального інструменту, при якому механічна обробка деталі виконується найбільш економічно при дотриманні вимог до точності, шорсткості та якості оброблених поверхонь. Це являє собою складне багатofакторне варіаційне завдання.

Призначення режимів обробки різанням розглядається як техніко-економічне завдання. Режими обробки впливають на показники виробництва як технічні, так і економічні. У зв'язку із цим розрахунок режимів різання є однією із самих масових задач у машинобудуванні.

При призначенні методу розрахунку режимів різання доцільно враховувати фактор оптимізації з комплексу параметрів якості поверхневого шару оброблюваних поверхонь і точності обробки. Обирання тих чи інших технічних обмежень залежить від виду обробки та визначається конкретними умовами задачі. Важливими технічними обмеженнями при розробці математичних моделей процесу різання є: різальні можливості інструменту, які визначаються його стійкістю; потужність електродвигуна приводу головного руху; найменша та найбільша швидкості різання (частота обертання шпинделя) та подача, які допускаються кінематикою верстата; міцність та жорсткість РІ; точність обробки; шорсткість обробленої поверхні тощо.

Існують кілька методів призначення режиму різання: табличний, аналітичний, графоаналітичний з використанням комп'ютерів і спеціальних програм розрахунку.

На підставі узагальнення результатів досліджень розроблено методику визначення оптимальних режимів механічної обробки КМ з використанням графоаналітичного методу .

На першому етапі вводяться початкові дані щодо параметрів операцій обробки КМ та обмеження по стійкості інструменту T , шорсткості отриманої після обробки поверхні за величинами R_a, R_z .

Далі, за допомогою бази даних "Технологічне обладнання" обираються обладнання та пристосування для обробки КМ. Якщо планується визначати один будь-який параметр режимів обробки, то застосовується експрес метод без застосування математичних моделей. При багатофакторному аналізі розробляються математичні моделі з застосуванням баз даних "Коефіцієнти математичних моделей процесу свердлення" (свідоцтво про державну реєстрацію №2010620114) та реєстрацію №2010620394).

В результаті аналізу отриманих математичних моделей розраховують допустимі величини зношування h_{zn} , стійкість T інструменту та параметри шорсткості $R_a = f(d, V, S)$ й $R_z = f(d, V, S)$ як функцію від діаметру свердла d , швидкості обробки V та подачі інструменту S .

Якщо отримані значення параметрів шорсткості задовільняють технічним вимогам, то відбувається розробка технічної документації на технологічний процес механічної обробки. У протилежному випадку весь алгоритм повторюється з початку. "Величини допустимого зносу свердла" (свідоцтво про державну Застосування даної методики на практиці дозволить визначати оптимальні режими обробки КМ з урахуванням технічних умов до оброблених деталей, що забезпечить підвищення продуктивності та зниження собівартості механічної обробки КМ з одночасним дотриманням вимог щодо якості готового виробу.

3.3 Принципи формування оптимальної якості поверхні інструменту для даних умов обробки і мінімізації зносу

Реалізація потенційних можливостей, закладених у композитах, багато у чому залежить від ступеня гарантованого забезпечення якості виробів на етапі їх механічної обробки, зокрема різання.

Забезпечення високих вимог до якості оброблених поверхонь КМ, а, отже, і до якості готових виробів з композитів, залежить від ряду чинників: від вихідних властивостей КМ, умов і режимів обробки, характеристик РІ [50]. Очевидно, що якість і собівартість виробу з КМ, продуктивність його механічної обробки для кожних конкретних умов і режимів різання значною мірою буде залежати від якості поверхневих шарів РІ. Саме тому питання формування оптимальних значень показників якості поверхні РІ наразі є, безперечно, актуальним.

Останнім часом для вирішення багатьох технічних і технологічних задач у всьому світі набуло застосування методів менеджменту якості [93, 91], які базуються на стандартах ISO серії 9000, моделюванні процесів інструментами математичної статистики, застосуванні семи простих у використанні наочних методів аналізу процесів – «інструментів управління якістю». Тому для вирішення поставленої задачі у роботі використовували один з таких «інструментів управління якістю» – діаграму Ісікави, відому також як діаграма «аналізу кореневих причин» або «причинно-наслідкових зв'язків» [94]. Вона надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес або подію, а також сприяє визначенню головних чинників, які спричиняють найзначніший внесок до проблеми, що розглядається, та попередженню або усуненню їх дії.

У правій частині схеми зображується досліджувана подія. Від неї

виходить центральна вісь діаграми. Від центральної вісі, як від дерева, виходять гілки, кожна з яких відповідає своєму класу причин. На кожній гілці будуються додаткові відгалуження, кожна з яких позначає окрему причину в своєму класі тощо. Виходить схема, яка нагадує риб'ячу кістку і за якою можна встановити причинно-наслідковий зв'язок між подіями.

Діаграму Ісікави використовували для визначення чинників, які можуть мати потенційний вплив на встановлення показників якості сформованих поверхневих шарів РІ, які працюватимуть у конкретних умовах під час механічної обробки КМ. Побудова відбувалася за результатами аналізу даних літературних джерел, власних досліджень авторів та застосування методу експертного опитування. У якості експертів, кількість котрих дорівнювала 12, виступали провідні фахівці ВНЗ та наукових установ НАН України, а також промислових підприємств, пов'язаних із механічною обробкою взагалі та КМ зокрема.

Звичайно, розроблена діаграма не претендує на вичерпність, адже існує достатньо велика кількість чинників, які можуть мати більший чи менший, прямий чи опосередкований впливи на необхідну якість поверхні РІ. Проте, врахування всіх з них значно ускладнило б схему й знизило можливість та ефективність її практичного застосування. Тому під час побудови діаграми Ісікави автори враховували лише такі чинники, які, на їх розсуд, матимуть найбільший вплив на встановлення показників якості сформованих поверхневих шарів РІ.

Аналіз отриманої діаграми показав, що всі чинники, які впливають на формування оптимальної якості поверхні РІ, можна розділити на ряд груп (вихідні характеристики РІ; вихідні характеристики КМ, який підлягатиме механічній обробці; параметри технологічного процесу поверхневого зміцнення РІ; режими (умови) механічної обробки

КМ; персонал; вимоги до показників якості поверхонь КМ після механічної обробки), кожна з яких містить від 3 до 7 чинників. Так, наприклад, для групи «вихідні характеристики РІ» такими чинниками є: фізико-механічні властивості; матеріал основи (хімічний склад); вихідна якість поверхні; геометричні характеристики; призначення РІ (свердло, різець, фреза тощо); дефекти поверхні та основи.

Якщо мова йде про властивості покриттів на РІ, які визначають параметри якості поверхні інструменту, то можна запропонувати такий поділ чинників:

1. Чинники, пов'язані з параметрами процесу нанесення покриття (наприклад, температура підкладки і самого процесу, взаємодія реагентів і продуктів реакції, механічні напруження, що виникають у покритті внаслідок термічного та ударного впливу при бомбардуванні потоками і різними частинками та ін).

2. Чинники, пов'язані зі станом підкладки, покриття та всієї системи «підкладка-покриття» в цілому.

3. Чинники, пов'язані зі структурним зміцненням (мікроструктурою), серед яких розмір і орієнтація зерен, границі зерен, щільність

Отже, основними напрямками зміни властивостей поверхневого шару РІ з метою підвищення його працездатності за рахунок нанесення зносостійких покриттів є: структурне зміцнення матеріалу зносостійкого покриття; підвищення міцності зв'язку границі «покриття – інструментальний матеріал»; зміна фізико-хімічної взаємодії на границі «покриття - оброблюваний матеріал».

Вибір складу покриття повинен здійснюватися, виходячи з умови максимального зниження ймовірності захоплення між оброблюваним матеріалом і покриттям.

При виборі складу покриття необхідно забезпечувати досить високе значення міцності адгезії між матеріалами покриття й інструменту.

Задовільна працездатність інструменту з покриттям може бути забезпечена при оптимальних значеннях основних параметрів покриття (товщина, співвідношення товщин шарів, мікротвердість, фазовий склад, структура тощо). Тому при розробці інструменту з покриттям необхідно вирішувати завдання оптимізації параметрів покриття залежно від умов процесу різання.

На підставі узагальнення результатів дослідження розроблено принципи формування оптимальної якості поверхні РІ для даних умов обробки КМ :

1. На формування оптимальної якості поверхні РІ впливають такі групи чинників: вихідні характеристики РІ; вихідні характеристики КМ, який підлягатиме механічній обробці; параметри технологічного процесу поверхневого зміцнення РІ; режими (умови) механічної обробки КМ; персонал; вимоги до показників якості поверхонь КМ після механічної обробки.

2. Одним з основних принципів формування оптимальної якості поверхні РІ є одночасне врахування при цьому якомога більшої кількості (в ідеалі – всіх) вказаних груп чинників під час створення або модифікування (зміцнення) поверхні інструменту, адже вони мають між собою достатньо сильну і складну за характером взаємодію. Ця задача повинна вирішуватися завдяки широкому застосуванню моделювання та методів багатопараметричної та багатокритеріальної оптимізації, інтегрованих із сучасним програмним забезпеченням та комп'ютерними технологіями.

3. Рекомендований склад показників, за якими доцільно проводити оцінку якості поверхні РІ, є наступним [49]: геометричні характеристики

поверхні; фізико-механічні характеристики; фізико-хімічний стан поверхневого шару.

4. Оптимальна технологічна якість поверхні РІ отримується за виконання таких умов: епюри напружень повинні забезпечити утворення нових поверхонь при максимальному руйнуванні й рівномірному зміцненні поверхневого шару; умови середовища повинні забезпечити зменшення поверхневої енергії, полегшення виходу дислокацій на поверхню, пластифікування й локалізацію деформацій у тонких поверхневих шарах; структурний стан поверхневого шару після обробки повинен характеризуватися однорідністю при мінімальній густині недоліків внутрішньої будови або їх нерівномірному розподілу.

5. Оптимальна експлуатаційна якість поверхні РІ отримується за виконання таких умов: структурний стан повинен забезпечити утворення однорідного шару ультрадисперсної будови мінімальної товщини; поверхня повинна бути достатньо активована для протікання структурного пристосування, стійкість якого при терті зумовлюється динамічною рівновагою процесів утворення і руйнування вторинних структур, а також утворення граничного шару змазки; епюри напружень повинні відповідати максимально можливій деконцентрації зовнішнього навантаження поверхні металу, яка забезпечує рівномірність утворення текстур і руйнування плівок окислів.

Використання запропонованих принципів на практиці стане ще одним кроком на шляху вирішення основної проблеми при механічній обробці КМ – забезпечення потрібної якості поверхні готового виробу із одночасним підвищенням продуктивності обробки і стійкості інструменту, що є основним лімітуючим чинником, який визначає вибір раціональних умов різання, матеріалу, форми та показників якості поверхні різального інструменту.

3.4 Методика підвищення продуктивності та якості інструменту при обробці композиційних матеріалів. Фізико-технологічні основи підвищення продуктивності обробки композиційних матеріалів

Одними з найбільш важливих показників експлуатації РІ є його працездатність, яка визначає стан, при якому ріжучий інструмент виконує свою роботу, маючи при цьому знос робочих поверхонь менше критичного значення, та продуктивність, яка визначається кількістю деталей, що обробляються за певний час T (зміна, год. тощо). Підвищити продуктивність та якість РІ можна шляхом проведення конструкторсько-технологічних і експлуатаційних заходів: 1) оптимізація вибору інструментального матеріалу; 2) поліпшення шорсткості поверхонь інструменту; 3) оптимізація режимів обробки; 4) оптимізація геометричних параметрів; 5) зміцнення ріжучої частини інструмента; 6) ефективне використання мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) та ін. Крім того, зазначені фактори впливають на якість оброблюваної поверхні.

Продуктивність РІ може бути підвищена завдяки зміні поверхневих властивостей інструментального матеріалу, при якому контактна поверхня інструменту буде найбільш ефективно чинити опір абразивному, адгезійному, корозійно-окислювальному та іншими видами зносу як при кімнатній, так і при підвищеній температурах. Оптимізація вибору інструментального матеріалу залежить від багатьох факторів: оброблюваного матеріалу, виду обробки, застосовуваного устаткування, жорсткості системи СПД і від регламентованих режимів різання.

На підставі узагальнених результатів дослідження розроблено методику підвищення продуктивності та якості інструменту при обробці КМ, представлену на рис. 3.5.

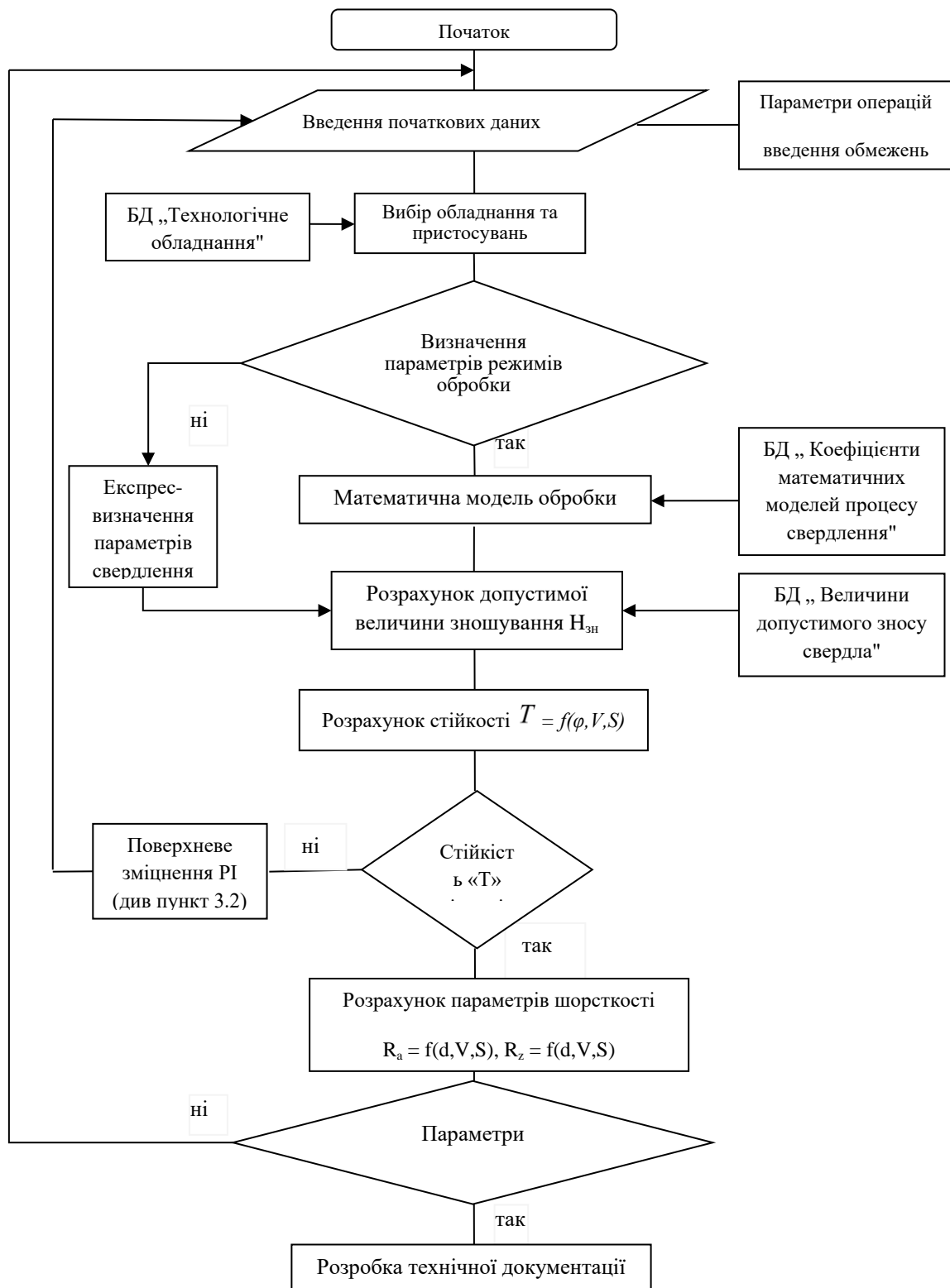


Рис. 3.5 – Методика підвищення продуктивності та якості інструменту при обробці композиційних матеріалів

Поліпшення шорсткості поверхонь РІ, що контактують зі стружкою і оброблюваної заготовкою, дозволяє знизити інтенсивність зношування цих поверхонь і, як наслідок, підвищити працездатність інструменту.

Оптимізація геометричних параметрів забезпечує отримання максимально можливої економічної стійкості. Крім того, дослідження показали, що при обробці КМ велике значення для збільшення стійкості інструменту має його заточка з мінімальним радіусом округлення різальної кромки. Досягти якісної геометрії ріжучих елементів можливо з використанням сучасних технологій виробництва інструментів. Таким чином, вдосконалення технології виробництва РІ можливо при широкому використанні прогресивних технологій в поєднанні з високоточним автоматизованим обладнанням, що дозволяє підвищити якість інструменту і його ефективність.

Для зміцнення ріжучої частини інструменту використовували такі методи модифікування: іонно-плазмова обробка, ЕІЛ + біопокриття, ЕІЛ + ЛО, термоциклічне іонно-плазмове азотування (ТЦПА) у пульсуючому тліючому розряді.

Підвищенню стійкості ріжучих інструментів сприяє ефективне використання МОТС, які забезпечують зниження температури різання, підвищення якості обробленої поверхні і отримання транспортабельної форми стружки. В якості МОТС застосовують зазвичай різні ЗОР, аерозолі, стиснене повітря та ін. Ефективність їх використання полягає в тому, що вони надають змащувальну дію, що зменшує тертя робочих поверхонь інструменту о стружку і оброблювану поверхню заготовки, ліквідує явище схоплювання, а також приводить до видалення стружки із зони різання; охолоджуючу дію, що викликає зниження температури нагріву робочих поверхонь інструменту; ріжучу дію, що полегшує процес різання внаслідок зменшення роботи і сил необхідних для деформування і руйнування зрізаного шару; хімічний захист заготовки, що утворюється в процесі різання обробленої поверхні, від шкідливого впливу атмосфери повітря.

Однак, застосування ЗОР при обробці композиційних неметалевих матеріалів у зв'язку зі специфічними властивостями таких матеріалів значно обмежене і, в даних експериментах не застосовувалося.

Узагальнюючи вищесказане, можна зробити наступні висновки.

Підвищити продуктивність РІ можна шляхом оптимізації наступних умов:

- поєднання міцнісних, теплофізичних і хімічних властивостей інструментального матеріалу, забезпечуваних використанням нових або зміцненням традиційних інструментальних матеріалів;
- режимів різання, геометричних параметрів і початкової мікрогеометрії інструменту, що знижують контактні навантаження на поверхню леза.

Як зазначалось вище, фактори, які впливають на якість та працездатність інструменту також впливають на якість оброблюваної поверхні заготовки. Так на рис. 3.7 показано залежність якості отриманного отвору від конструкції та геометричних параметрів інструменту.



Рис. 3.7 – Зображення отвору на вході після обробки вуглепластика

a – спіральним свердлом $2\varphi_2=110^\circ$; *б* – спіральним свердлом $2\varphi_2=130^\circ$;
в – спіральним свердлом $2\varphi_2=120^\circ$

При проведенні експерименту були отримані результати по відхиленню від круглості при свердлінні різних марок ПКМ рис.3.8

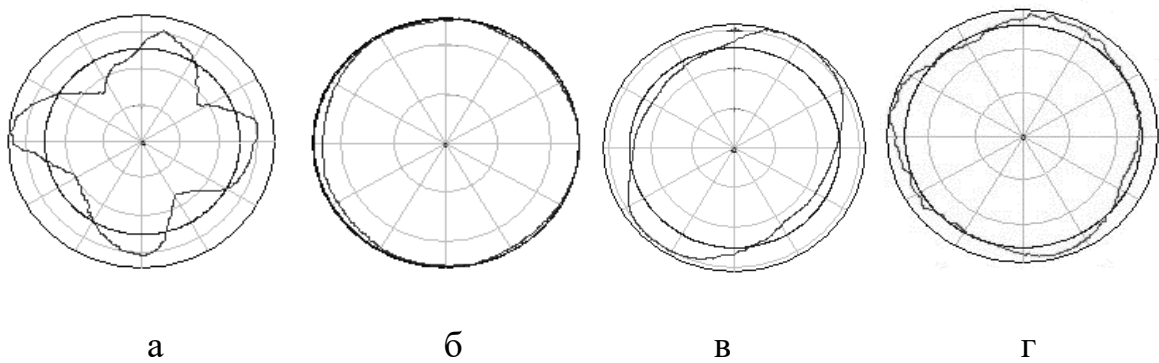


Рис. 3.8 – Відхилення отворів від круглої форми

а) обробка склопластика; б) обробка для вуглепластика; в) обробка текстоліту; г) обробка стеклотекстоліту

Застосування запропонованої методики та фізико-технологічних основ підвищення продуктивності обробки композиційних матеріалів на виробництві надає можливість отримати значну економію матеріально-технічних ресурсів за рахунок керування процесами контактної взаємодії в системі "інструмент-деталь" і, як наслідок, підвищення зносостійкості РІ, продуктивності механічної обробки КМ з одночасним покращенням якості кінцевих виробів. Це сприятиме підвищенню конкурентноспроможності продукції вітчизняного авіакосмічного та загального машинобудування на світовому ринку.

Висновок :

Проведено класифікацію композиційних матеріалів та проаналізовано ефективність методів неруйнівного контролю конструкцій із композитів. Встановлено, що композиційні матеріали характеризуються істотним розходженням фізичних властивостей та анізотропією, що значно ускладнює їх механічну обробку та контроль якості виготовлених виробів.

Застосування фізико-технологічні основ на виробництві надає можливість отримати значну економію матеріально-технічних ресурсів за рахунок керування процесами контактної взаємодії в системі "інструмент-деталь" і, як наслідок, підвищення зносостійкості РІ, продуктивності механічної обробки композиційних матеріалів з одночасним покращенням якості кінцевих виробів. Це сприятиме підвищенню конкурентноспроможності продукції вітчизняного авіакосмічного та загального машинобудування на світовому ринку.

Список літератури

1. Справочник по композиционным материалам. В 2-х т. / Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988.
2. Довідник по композиційним матеріалам: в 2-х кн .; під ред. Дж. Любина; пер. з англ. А.Б. Геллера.- М .: Машинознавство
3. Композиционные материалы волокнистого строения / Под ред. И. Н. Францевича и Д. М. Карпиноса. – К.: Наукова думка, 1970. – 403с.
4. Воробей В.В. З'єднання конструкції з композиційних матеріалів / В.В. Воробей, О.С. Сироткін. - Л .: Машинобудування
5. Трибологія: підручник / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Е. В. Корбут. – К.: Вид-во НАУ авіац. ун-ту «НАУ – друк». – 2009. – 392с.

6. Бондаренко В. П. Триботехнические композиты с высококомодульными наполнителями / Бондаренко В. П. – К.: Наук. думка, 1987. – 232с.
7. Материаловедение: Учебник для ВТУЗ / [Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др.]: Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384с.
8. Родін П.Р. Основи проектування ріжучих інструментів і їх раціональна експлуатація: підручник / П.Р. Родін. - К .:
9. Мамлюк О.В. Основи формоутворення поверхонь: лаб. практикум / О.В. Мамлюк, Б.В. Лупкін.
10. ТИ 36-39-89 технологічна інструкція. Виконання клепаних і болтових з'єднань в конструкціях, що містять полімерні матеріали.
11. Лупкін Б.В. Наукові основи механічної обробки композиційних матеріалів, що застосовуються в авіабудуванні: автореф. дис. ... д-ра техн. наук.
12. Структура и прочность композиционных материалов: Учебное пособие / А. И. Хацфинов, А. М. Новцов, Т. В. Бурдикова, А. В. Беляков. – Казань: КГТУ, 2000. – 152с.
13. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / [Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько та ін.]. – К.: Вища освіта, 2003. – 399с.
14. Ажажа В. М. Углерод-углеродные материалы / В. М. Ажажа, И. В. Гурин, И. М. Неклюдов. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2009. – 22с.
15. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
16. ДСТУ 2865-94 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення
17. ГОСТ 23829-85 Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения.

18. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение,
19. Овсянкін А. М. Акустичний контроль габаритних конструкцій повітряних суден з полімерних композиційних матеріалів / А. М. Овсянкін, В. С. Єременко, Є. Ф. Суслов, В. А. Мотрук // АВІА-2009 : Матеріали 9-ї міжнар. наук.-техн. конф.
20. Лобанов Л. М. Оперативний контроль якості елементів авіаційних конструкцій методом електронної широкографії / Л. М. Лобанов, С. А. Бичков, В. А. Півторак, В. Я. Дереча та ін. // Фізико-хімічна механіка матеріалів.
21. Rastogi P. K. Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection P. K. Rastogi / Amsterdam Lausanne: Elsevier,
22. Лобанов Л. М. Методика, технология и аппаратура широкографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразр.
23. Лобанов Л. М. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широкографии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразр. контроль.
24. Переїденко А. В. Система кластерного аналізу результатів неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів / А. В. Переїденко, В. С. Єременко, В. О. Роганьков
25. Єременко В. С. Класифікатор стану виробів із композиційних матеріалів на основі нейронної мережі адаптивної резонансної теорії / В. С. Єременко, А. В. Переїденко, П. А. Шегедін //
26. Лабунець В. Ф. Причини та характер зношування різального інструменту при механічній обробці різанням титановмістних

композиційних матеріалів / В. Ф. Лабунець, Є. В. Корбут, О. В. Радько, В. С. Шевчук, В. В. Загребельний // Проблеми тертя та зношування

27. Korbut E. V. Procesy zuzycia wedlug schematu “narzedzie tnace – stopy tytanu”/ E. V. Korbut, E. Wajs, O. V. Radko, V. F. Labunec, W. W. Zagrebelny

28. Глоба А. В. Исследование процесса сверления полимерных материалов трехперыми сверлами с целью улучшения качества отверстий / А. В. Глоба, В. И. Унрод, Я. Качмарек // Вісник ЧДТУ, сер. Машинобудування

29. Криштопа Н. А. Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалов / Н. А. Криштопа, С. П. Радзевич, А. И. Бобко.

30. Ajayan P. M. Nanocomposite Science and Technology / P. M. Ajayan, I. S. Schadler, P.V . Braun. – 2003. WILEY-VCN Verlag GmbH Co. KGaA. – Weinheim.